

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

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 330, № 4, 2019

Издательство Томского политехнического университета 2019

## ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

#### Редакционная коллегия

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

научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

#### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



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

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY GEO ASSETS ENGINEERING

Volume 330, Nº 4, 2019

Tomsk Polytechnic University Publishing House 2019

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

### **Editorial Board**

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

### AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

© Tomsk Polytechnic University, 2019

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

7

59

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

Экспериментальные исследования работы пневмопружинного компенсатора давления с квазинулевой жесткостью Зотов А.Н., Думлер Е.Б., Уразаков К.Р., Вахитова Р.И., Думлер О.Ю., Тугунов П.М. Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья Чечель Л.П., Замана Л.В. Применение методов электроразведки с контролируемыми источниками для выявления причин развития суффозионно-просадочных процессов

Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О., Бабушкин С.М. Способ виброструйной гидродинамической технологии сохранения текучести углеводородных топлив и нефтепродуктов

в условиях низких температур Азин А.В., Богданов Е.П., Пономарев С.В., Рикконен С.В.

Исследование работы низковольтного ударного генератора в устройстве электрогидравлического воздействия для малоглубинной сейсморазведки Пустынников С.В., Носов Г.В., Хан Вей, Носова М.Г.

Диагностирование состояния газоперекачивающих агрегатов специальными методами интерпретации спектров виброскорости Байков И.Р., Смородова О.В., Китаев С.В., Шаммазов А.М.

Исследование процесса агломерации пылевидного галургического хлорида калия Черепанова М.В., Кузина Е.О., Пойлов В.З., Мунин Д.А.

Черепанова М.В., Кузина Е.О., Пойлов В.З., Мунин Д.А. Анализ углеродных материалов, используемых в качестве анодов в производстве фтора Софронов В.Л., Молоков П.Б., Муслимова А.В., Полянская А.В., Дамм Ю.П., Рудников А.И.

Перспективы развития технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин для бестраншейной прокладки трубопроводов

саруев Л.А., Шадрина А.В., Саруев А.Л., Васенин С.С., Пахарев А.В.

Совершенствование технологии переработки сунгулит-вермикулитовых конгломератов Нижегородов А.И., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б.

Определение параметров живучести защищенных ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении Однокопылов Г.И., Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р.

Математическое моделирование процессов теплопереноса при работе теплонасосных систем использования геотермальной энергии Максимов В.И., Салум А.

Геохимия урана и тория в донных отложениях малых искусственных водоемов и озер на территории юга Томской области Иванов А.Ю., Арбузов С.И.

Исследование фильтрационных и реологических свойств полимерного геля для повышения нефтеотдачи пластов Нажису, Ерофеев В.И., Лу Цзиньлун, Ван Вэй

Нажису, срофеев Б.И., Лу Цзинылун, ван вэй Идентификация параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонансным частотам Гаврилин А.Н., Кладиев С.Н., Глазырин А.С., Боловин Е.В., Полищук В.И. Experimental studies of operation of a pneumatic spring pressure compensator with quasi-zero stiffness Zotov A.N., Dumler E.B., Urazakov K.R., Vakhitova R.I., Dumler O.Yu., Tugunov P.M.

- 17 Geochemical types of waters of lead-zinc deposits tailings in the Eastern Transbaikalia Chechel L.P., Zamana L.V.
- 26 Application of methods of electrical exploration with controlled sources for detecting causes of sub-pass-location processes development Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O., Babushkin S.M.
- 41 Method of vibro-jet hydrodynamic technology to retain the fluidity of hydrocarbon fuels and petroleum products at low temperatures Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V.
- 49 Investigation of operation of a low-voltage shock generator in an electrohydraulic device for seismic exploration at small depth
  - Pustynnikov S.V., Nosov G.V., Han Wei, Nosova M.G. Special methods for interpreting

the speed vibration spectrum for diagnostic of gas-pumping unit state Baykov I.R., Smorodova O.V., Kitaev S.V., Shammazov A.M. 68 Research of pulverized halurgic

- potassium chloride agglomeration Cherepanova M.V., Kuzina E.O., Poylov V.Z., Munin D.A.
   78 Analysis of carbon materials used
- as anodes in fluorine production Sofronov V.L., Molokov P.B., Muslimova A.V., Polyanskaya A.V., Damm Yu.P., Rudnikov A.I.
- 89 Prospects for development of technology and facilities of pilot bores horizontal directional drilling for trenchless laying of pipelines Saruev L.A., Shadrina A.V., Saruev A.L., Vasenin S.S., Pakharev A.V.
- 98 Improving the technology for processing sungulite-vermiculite conglomerates Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B.
   110 Determination of vitality parameters
  - Determination of vitality parameters of protected critical engineering structures under shock-wave loading
     Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R.
- 126 Mathematical modeling of heat transfer by operation of geothermal heat pumps Maksimov V.I., Saloum A.
- 136 Geochemistry of uranium and thorium in bottom sediments of small artificial water reservoirs and lakes in the south of the Tomsk region Ivanov A.Y., Arbuzov S.I.
- 147 Study of filtration and rheological properties of polymer gel to improve oil recovery Narisu, Erofeev V.I., Lv Jinlong, Wang Wei
- Identification of parameters of vibration electromagnetic activator mechanical system using limiting near-resonance frequency Gavrilin A.N., Kladiev S.N., Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Polishchuk V.I.

Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме	178	Sucker-rod pumping unit balance diagnostics by wattmeter card
Зюзев А.М., Бубнов М.В.		Zyuzev A.M., Bubnov M.V.
Эффективность взрывной отбойки руды	188	Efficiency of ore blasting
в пологих маломощных залежах Лукьянов В.Г., Голик В.И., Комашенко В.И.		Lukyanov V.G., Golik V.I., Komashchenko V.I.
Построение температурных корреляционных	194	Computing of temperature
зависимостеи между горизонтами почв при проведении исследований с использованием		soil layers in research
малоглубинных скважин		with shallow boreholes
Ботыгин И.А., Крутиков В.А., Шерстнёва А.И., Демешко М.В., Канаева И.А., Солтаганов Н.А.		Botygin I.A., Krutikov V.A., Sherstneva A.I., Demeshko M.V., Kanaeva I.A., Soltaganov N.A.
Расчет устойчивости склонов на участках	208	Calculation of stability of slopes
строительства ооъектов спортивно-туристического комплекса «Горный возлух»		and tourist complex «Gorny vozdukh»
(гора Большевик, г. Южно-Сахалинск) Ильин В.В., Сахаров В.А.		(mountain Bolshevik, Yuzhno-Sakhalinsk) Ilin V.V., Sakharov V.A.
Индикаторы ядерного техногенеза на примере	217	Indicators of nuclear technogenesis on the example
территории, прилегающеи к оывшему		Seminalatingk test site
Семиналатинскому испытательному полигону		Jambavev M T Baranovskava N V
Липихина А.В., Боев В.В., Райымкулова М.К.,		Lipikhina A.V., Boev V.V., Apsalikova Z.S., Baiymkulova M.K., Sudyko A.F.
Ансаликова Э.С., Судыко А.Ф.		

УДК 622.276.53.054.23:621.67-83

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ПНЕВМОПРУЖИННОГО КОМПЕНСАТОРА ДАВЛЕНИЯ С КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

## Зотов Алексей Николаевич<sup>1</sup>,

a-zot2@yandex.ru

## Думлер Елена Борисовна<sup>1</sup>,

dumler08@mail.ru

## Уразаков Камил Рахматуллович<sup>1</sup>,

UrazakK@mail.ru

## Вахитова Роза Ильгизовна<sup>2</sup>,

roza-w@mail.ru

## Думлер Олег Юрьевич<sup>3</sup>,

mail@ntehn.ru

## Тугунов Павел Михайлович<sup>1</sup>,

info@rusoil.net

- <sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.
- <sup>2</sup> Альметьевский государственный нефтяной институт, Россия, 423450, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2.
- <sup>3</sup> ООО «Новые технологии», Россия, 422980, г. Чистополь, ул. Карла Маркса, 168 с.

**Актуальность** исследования обусловлена воздействием вибрации на элементы установки погружного электроцентробежного насоса. Наличие вибрационных процессов увеличивает количество преждевременных отказов узлов установки. Одной из причин проявления вибрационного воздействия на электроцентробежную насосную установку являются перепады давления на выкиде погружного электроцентробежного насоса, при этом частоты таких перепадов невелики.

**Цель:** разработка лабораторной установки, которая имитирует колебательные процессы, происходящие на выкидной линии электроцентробежного погружного насоса в нефтяной добывающей скважине.

**Объекты:** модель пневмопружинного компенсатора давления с квазинулевой жесткостью, конструктивно представляющего собой пневматическую пружину, внутри которой расположен пакет из пяти последовательно установленных тарельчатых пружин. **Методы:** численные решения дифференциальных уравнений, теория колебаний, математический анализ, математическая статистика, методы математического моделирования.

**Результаты.** Разработана лабораторная установка, позволяющая провести исследования модели пневмопружинного компенсатора давления с квазинулевой жесткостью, конструктивно представляющего собой пневматическую пружину, внутри которой расположен пакет из пяти последовательно установленных тарельчатых пружин. Система с квазинулевой жесткостью представляет собой совокупность пневмопружины, имеющей силовую характеристику с рабочим участком положительной жесткости, и пакета последовательно соединенных тарельчатых пружин, имеющего силовую характеристику с рабочим участком положительной жесткости, и пакета последовательно соединенных тарельчатых пружин, имеющего силовую характеристику с рабочим участком отрицательной жесткости. У с рабочим участком положительной жесткости, и пакета последовательно соединенных тарельчатых пружин, имеющего силовую характеристику с рабочим участком отрицательной жесткости. У с участком квазинулевой жесткости при заданном давлении. Результатом исследований на лабораторном стенде стало совпадение с заданной погрешностью замеров размаха колебаний и теоретически предсказанных результатов, что позволило доказать правильность теоретических выводов.

#### Ключевые слова:

Установка электроцентробежного погружного насоса, лабораторная установка, пневмопружинный компенсатор давления, пневмопружина, квазинулевая жесткость, отрицательная жесткость, тарельчатые пружины.

#### Введение

Установки электропогружных центробежных насосов (УЭЦН) на современном этапе являются основным оборудованием для добычи нефти на нефтяных промыслах Российской Федерации.

Одной из существенных причин колебательного воздействия на насосную погружную установку являются скачки давления на выкидной линии УЭЦН, при этом частоты этих скачков невелики [1, 2]. Большая часть используемых насосных компенсаторов – это пневматические компенсаторы, представляющие собой газовые колпаки [3]. Для получения эффекта от пневмокомпенсатора такого типа в электроцентробежных насосах (ЭЦН) в скважинных условиях длина пневмоколпака будет составлять десятки метров, что технически достаточно сложно выполнить. Эффективным методом гашения низкочастотных колебаний является использование системы с квазинулевой жесткостью [4–14], которая в 70-х гг. ХХ столетия была предложена профессором П.М. Алабужевым для виброзащиты [15]. На основе пневмопружины и пакета последовательно соединенных тарельчатых пружин, расположенного внутри пневмопружины и подпирающего ее поршень, разработан пневмопружинный компенсатор давления с рабочим участком, имеющим силовую характеристику с квазинулевой жесткостью большой длины [1, 2, 16].

## Методика испытаний системы с квазинулевой жесткостью

Предлагаемая лабораторная установка состоит из пневмопружины, представляющей собой стальной цилиндр с поршнем, в которой расположен пакет из последовательно соединенных тарельчатых пружин (рис. 1). Параметры тарельчатых пружин рассчитали так, чтобы получилась силовая характеристика с участком квазинулевой жесткости при условии, что задано давление в пневмопружине.

В цилиндре – 7 расположен пакет из пяти последовательно соединенных тарельчатых пружин – 15, который жестко связан с поршнем – 6 с помощью втулки – 22. Для исключения смещения тарельчатых пружин при их осевом перемещении между ними устанавливают шайбы – 14. Для возбуждения вертикальных колебаний к набору грузов – 8 присоединен вибратор, который состоит из двигателя постоянного тока – 9, связанного с эксцентриком – 10. Грузы через специальный шток – 2 жестко соединены с поршнем – 6.

Участок квазинулевой жесткости получен после нагружения предлагаемого лабораторного стенда расчетным заданным весом на силовой характеристике этой системы. Внутренний диаметр цилиндра, где располагается пакет последовательно соединенных тарельчатых пружин, равен 0,0380 м; длина хода поршня H=0,1230 м (рис. 1). Внешний диаметр пакета тарельчатых пружин для цилиндра принимаем D=0,0370 м для того, чтобы пружины при сжатии не заклинивали, а внутренний диаметр d=0,0230 м. Пакет тарельчатых пружин включает в себя пять пружин – 1 и стальные шайбы – 2 (рис. 2, б) [17].

Решено изготовить тарельчатые пружины (рис. 2,  $\delta$ ) из пластического материала типа Flex, имеющего значение модуля упругости  $E=74\cdot10^6$  H/m<sup>2</sup>, на 3D принтере марки Rec [17]. В виду того, что тарельчатые пружины изготовлены из пластика, толщину конуса пружин принимаем s=0,0020 м (рис. 2, a). В случае использования более тонкой толщины конуса пружины при сжатии происходит ее изгиб. Высоту конуса пружины принимаем f=0,0050 м, для обеспечения заметной длины хода поршня (0,0250 м) (рис. 2, a).



Рис. 1. Лабораторная установка для проведения исследований колебаний: а) стенд для исследования низкочастотных колебаний; б) схема принципиальная: 1 – рама; 2 – шток; 3, 4 – специальные крепления; 5 – штатив; 6 – поршень; 7 – цилиндр; 8 – набор грузов; 9 – источник питания; 10 – эксцентрик; 11 – электродвигатель; 12 – неподвижный маркер; 13 – пневматическая камера; 14 – шайбы; 15 – тарельчатые пружины; 16 – кран; 17 – манометр; 18 – источник питания компрессора; 19 – компрессор; 20 – упор; 21 – резистор переменного тока; 22 – втулка

Fig. 1. Laboratory installation for research of oscillations: a) stand for studying low-frequency oscillations; 6) schematic diagram: 1 is the frame; 2 is the rod; 3, 4 are the special fasteners; 5 is the tripod; 6 is the piston; 7 is the cylinder; 8 is the set of weights; 9 is the power supply; 10 is the eccentric; 11 is the electric motor; 12 is the fixed marker; 13 is the pneumatic chamber; 14 are the washers; 15 is the dish-shaped springs; 16 is the crane; 17 is the manometer; 18 is the compressor power supply; 19 is the compressor; 20 is the stop; 21 is the alternating current resistor; 22 is the bushing



Рис. 2. Тарельчатая пружина: а) схема тарельчатой пружины: s – толщина конуса тарельчатой пружины; D – внешний диаметр тарельчатой пружины; d – внутренний диаметр тарельчатой пружины; f – высота конуса тарельчатой пружины; б) фотография тарельчатой пружины: 1 – пружина тарельчатая; 2 – шайба

Fig. 2. Dish-shaped spring: a) the diaphragm of spring arrangement: s is the thickness of the dish-shaped spring cone; D is the outside diameter of the dish-shaped spring; d is the inside diameter of the dish-shaped spring; f is the height of the dish-shaped spring cone; 6) photograph of the dish-shaped spring: 1 is the dish-shaped spring; 2 is the washers

Формула (1) определяет восстанавливающую силу предлагаемой системы, представляющей собой пневматическую пружину, внутри которой расположен пакет из пяти последовательно установленных тарельчатых пружин.

Показатель политропы принимаем равным единице, что является справедливым для не очень быстрых движений [18]. Первое слагаемое формулы (1) выражает восстанавливающую силу пневмопружины, а второе слагаемое этой формулы – восстанавливающую силу пакета из пяти последовательно установленных тарельчатых пружин.

$$F_{\Sigma} = \frac{p_0 SH}{(H-x)} + 8\pi Es\left(\frac{x}{N}\right) \times \\ \begin{cases} \left(f - \left(\frac{x}{N}\right)\right) \left(f - \left(\frac{x}{N}\right)/2\right) \times \\ \times \left[\frac{(D+d)}{2(D-d)} - \frac{1}{\ln(D/d)}\right] + \\ + s^2 \ln\left(\frac{D}{d}\right)/12 \\ \end{array} \right) \\ \times \frac{(D-d)^2}{(D-d)^2}, \qquad (1)$$

где  $p_0$  – начальное давление в пневмопружинном

компенсаторе давления; 
$$S = \frac{\pi \cdot 0.038^2}{4}$$
,  $M^2$  – пло-

щадь поршня; H=0,1230 м – высота цилиндра; N – количество тарельчатых пружин; E – модуль упругости первого рода материала тарельчатой пружины; s – толщина конуса тарельчатой пружины (рис. 2, *a*); x – осадка тарельчатой пружины; f=0,0050 м – высота конуса тарельчатой пружины (рис. 2, *a*); D=0,0380 м – внешний диаметр тарельчатой пружины (рис. 2, *a*); d – внутренний диаметр тарельчатой пружины (рис. 2, *a*).

Подбираем параметры предлагаемой лабораторной установки  $p_0$ , d, N, входящие в формулу (1), методом последовательных приближений в режиме работы с компьютером для обеспечения приемлемой величины квазипостоянной силы не более 200 Н.

Силовые характеристики, полученные по формуле (1), представлены на рис. 3. Зависимости 1 представляют собой полученные по формуле (1) суммарные силовые характеристики. Кривые 2 представляют зависимости первого слагаемого из формулы (1) от координаты – положительная же-



Рис. 3. Теоретические силовые характеристики лабораторной установки, полученные по формуле (1)

Fig. 3. Theoretical power characteristics of the laboratory installation, obtained by the formula (1)

a) s=0,0020 m; N=5; d=0,0230 m; 6) s=0,0020 m; N=10; d=0,0338 m; p\_0=10<sup>5</sup> H/m<sup>2</sup>; e) s=0,0020 m; N=5; d=0,0317 m; e) s=0,0020 m; N=10; d=0,0354 m; p\_0=2\cdot10<sup>5</sup> H/m<sup>2</sup>



Рис. 4. Зависимости критерия подобия σ<sub>t</sub>/E от осадки пружины: а) отношение σ<sub>t</sub>/E для тарельчатых пружин, рассчитанных для лабораторной установки: D=0,037 м; d=0,023 м; f=0,005 м; s=0,002 м; б) отношение σ<sub>t</sub>/E для тарельчатых пружин, рассчитанных для реальных скважинных условий: D=0,056 м; d=0,048 м; f=0,005 м; s=0,003 м

Fig. 4. Dependence of the similarity criterion  $\sigma_t/E$  on the spring draft: a) attitudes  $\sigma_t/E$  for dish-shaped springs designed for laboratory use: D=0,037 m; d=0,023 m; f=0,005 m; s=0,002 m; 6) attitudes  $\sigma_t/E$  for dish-shaped springs designed for real borehole conditions: D=0,056 m;d=0,048 m; f=0,005 m; s=0,003 m

сткость. Кривые 3 представляют зависимости второго слагаемого от координаты – отрицательная жесткость. Из рис. 3, *в*, *г* видно, что участки квазинулевой жесткости (величины квазипостоянных сил) более 200 Н, таким образом, масса грузов не должна превышать 20 кг для удобства проведения эксперимента. В результате анализа данных был принят вариант *a*.

При изготовлении лабораторной установки критерием подобия принято соотношение  $\sigma/E$ , применяемое в том случае, когда материалы промышленного образца и установки различны. Были подобраны такие параметры лабораторной установки, которые позволили обеспечить приемлемую величину квазипостоянной силы [19].

По формуле (2) определяется отношение [20]:

$$\frac{\sigma_{i\max}}{E} = -\frac{4x}{(D-d)^2} \left[ \left(\frac{2c}{d} - 1\right) \left(f - \frac{x}{2}\right) + \frac{s}{2} \frac{D-d}{d} \right], \quad (2)$$

где  $c = \frac{D-d}{2\ln \frac{D}{d}}; \sigma_t$  – максимальное напряжение в

меридиональном сечении диска тарельчатой пружины; *E* – модуль упругости материала пружины.

Как следует из правой части формулы (2), выбор материала тарельчатой пружины не важен, важны параметры пружины (модуль упругости не входит в нее).

На рис. 4 представлены зависимости критерия подобия  $\sigma_t/E$  от осадки пружины х для тарельчатых пружин, рассчитанных для лабораторной установки (график *a*), а для тарельчатых пружин, рассчитанных для реальных скважинных условий – график *б*. Размеры тарельчатой пружины для графика *б* были рассчитаны ранее в работе [2]. Из рис. 4 видно, что величины критерия подобия являются соизмеримыми в обоих вариантах, это говорит о правильном выборе размеров лабораторной установки.

Из-за силы сухого трения сложно демонстрировать квазинулевую жесткость. Определили силу сухого трения между цилиндром и поршнем. Для этого замерили время спуска поршня с высоты  $H=x_m=0,123$  м при воздействии веса  $m \cdot g$ , где m=0,656 кг – масса поршня со штоком; g=9,81 м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Формула, по которой рассчитывалась сила трения, следующая (элементарные выкладки опущены):

$$F_{\rm TD} = m \cdot g - 2m \cdot x_m / t_*^2, \qquad (3)$$

где *t*<sub>\*</sub> – время спуска поршня.

Среднее время спуска поршня по восьми проведенным опытам оказалось равным  $t_*=0,25$  с, тогда  $F_{\rm rp}\approx3,85$  Н. Сила трения, рассчитанная по формуле (3), принята равной 4 Н, так как из-за наличия избыточного давления в полости цилиндра сила трения может быть несколько выше.

На рис. 5 представлена силовая характеристика пакета пяти тарельчатых пружин, полученная теоретическим путем, с участком, имеющим отрицательную жесткость.



**Рис. 5.** Силовая характеристика тарельчатых пружин, полученная с учетом  $F_{\rm TD}$ =4 H

# Fig. 5. Power characteristic of the dish-shaped springs, obtained with regard to $F_{\rm tr}=4~N$

Теоретическая зависимость, определяемая вторым слагаемым формулы (1), показана сплошной линией синего цвета (рис. 5), а пунктирные линии показывают зависимость между восстанавливающей силой пакета пяти тарельчатых пружин и перемещением с учетом силы сухого трения  $F_m=4$  H.

При возвратно-поступательном перемещении поршня сила трения  $F_{\rm rp}$  то добавляется к теоретической характеристике (второе слагаемое уравне-

ния (1)  $+F_{\tau p}$ ), то вычитается из неё (второе слагаемое уравнения (1)  $-F_{\tau p}$ ), и в результате образуется петля гистерезиса, которая показана верхней и нижней пунктирными линиями (рис. 5). Силовая теоретическая характеристика с участком отрицательной жесткости представленна в диапазоне примерно от  $x\approx0,013$  м до x=0,025 м. Это значит, что определенному значению восстанавливающей силы F будут соответствовать две координаты x. Пакет пяти тарельчатых пружин нагрузили разными весами:  $m_{*1}g$ ,  $m_{*2}g$ ,  $m_{*3}g$  (рис. 5). Вес грузов выбирался с условием попадания в область полученной силовой характеристики для возможности тарирования лабораторной установки.

Взяли массы:  $m_{*1}=2,000$  кг,  $m_{*2}=2,250$  кг,  $m_{*3}=2,500$  кг. Это массы грузов – 8 (рис. 1) в сумме с массой поршня и штока. Эксперименты проводились по следующему алгоритму. Замеряли перемещения поршня  $x_1$  при нагружении его весами  $m_{*1}g$ ;  $m_{*2}g$ ;  $m_{*3}g$ , далее проводили полное сжатие пакета пяти тарельчатых пружин и после освобождения пакета пяти тарельчатых пружин замеряли второе перемещение поршня  $x_2$  для одного и того же веса. Массы грузов с учетом вычета массы штока следующие:

 $m_{*1}-m_{m_{T}}=2,000-0,656=1,344$  KF;  $m_{*2}-m_{m_{T}}=2,250-0,656=1,594$  KF;  $m_{*3}-m_{m_{T}}=2,500-0,656=1,844$  KF.

Провели восемь опытов, с точностью замеров до 0,5 мм.

Результаты экспериментов для массы *m*<sub>\*1</sub>=2,000 кг приведены в табл. 1.

Table 1.Piston movements

mg

100

50

Номер варианта Version no.	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>x</i> <sub>1</sub> , мм (mm)	8,5	9	8	9	8,5	8,5	9	9
<i>x</i> <sub>2</sub> , мм (mm)	16	17	17	16,5	16,5	17	17	17

Результаты экспериментов для массы m<sub>\*2</sub>=2,250 кг приведены в табл. 2.

#### Таблица 2. Перемещения поршня

Table 2.Piston movements

Номер варианта Version no.	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>x</i> <sub>1</sub> , мм (mm)	6,5	6,5	7	6	6,5	7	6	$^{6,5}$
$x_2$ , MM (mm)	20	20,5	20,5	20	20	20,5	20,5	19

Результаты для массы  $m_{*3}$ =2,500 кг приведены в табл. 3.

#### Таблица 3. Перемещения поршня

Table 3.	Piston	movements	
----------	--------	-----------	--

Номер варианта Version no.	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>x</i> <sub>1</sub> , мм (mm)	$^{5,5}$	6	7	6	$^{5,5}$	6	6	5
<i>x</i> <sub>2</sub> , мм (mm)	23	24	23,5	24	23	23	24	23,5

Средние значения перемещений (табл. 1–3) отмечены точками и, как видно из графика рис. 5, попадают в петлю гистерезиса, это говорит о сходимости результатов эксперимента и опыта.

На рис. 6, *а* показана силовая характеристика, полученная теоретическим путем, с учетом силы сухого трения. Чтобы попасть на участок с квазинулевой жесткостью необходимо систему нагружать некоторым весом m'g, в этом случае начало координат силовой характеристики сместится приблизительно на середину с координатой x0.

Величину массы *m*' определили визуально (рис. 6, *a*), она равна, учитывая массу штока,  $m'\approx 15,200$  кг. Нагрузив лабораторный стенд весом *m'g* получили силовую характеристику  $F_{\Sigma}(x)$ , представленную на рис. 6, *б*.Функция  $F_{\Sigma}(x)$  получена аналитическим путем из формулы (1):

$$\widehat{F}_{\Sigma}(x) = F_{\Sigma}[x - x0] - m'g, \qquad (4)$$

где  $F_{\Sigma}$  – функция, определяемая по формуле (1).

Из-за присутствия сил сухого трения теоретическая силовая характеристика принимает вид петли гистерезиса. При полученной силовой характеристике свободные колебания поршня описываем, используя формулу (4), дифференциальным уравнением:



- Рис. 6. Силовые характеристики лабораторной установки: а) без нагружения: 1 силовая характеристика пакета тарельчатых пружин; 2 силовая характеристика пневмопружины; 3 суммарная силовая характеристика; х0 координата точки А (начало участка, имеющего квазинулевую жесткость); б) после нагружения весом т'g (F<sub>1</sub> сила сухого трения)
- Fig. 6. Power characteristics of laboratory installation: a) without loading: 1 is the power characteristic of the dish-shaped springs package; 2 is the power characteristic of a pneumospring; 3 is the total power characteristic; x0 is the coordinate of point A (the beginning of the section having quasi-zero rigidity); b) after loading by weight ( $F_{tr}$  is the force of dry friction)

$$m' \cdot \ddot{x} = -(F_{\Sigma}[x - x0] - m'g) - F_{TP} \cdot \text{sign}[\dot{x}].$$
 (5)

Начальные условия: при  $x_0=0$ ,  $x_0=0,0100$  м. Решение дифференциального уравнения (5) при различном значении сил сухого трения  $F_{\rm rp}$ представлено на рис. 7.



**Рис. 7.** Решение дифференциального уравнения (5): а) F<sub>тр</sub>=0,5 H; б) F<sub>тр</sub>=1 H; в) F<sub>тр</sub>=4 H

Fig. 7. Solution of the differential equation (5): a)  $F_{tr}=0.5 N$ ; 6)  $F_{tr}=1 N$ ; 6)  $F_{tr}=4 N$ 

Из рис. 7 видно, что при  $F_{\tau p}=4$  Н пропадают затухающие колебания, то есть весьма затруднительно подтвердить экспериментальным путем существование полученной силовой характеристики, замеряя перемещение поршня после его отклонения на определенную величину, например, на 1 см.

Изменяя массу, длину и частоту вращения эксцентрика – 10 (рис. 1), была задана необходимая возмущающая сила, которой будет соответствовать расчетная амплитуда вынужденных колебаний.

В случае совпадения расчетных и экспериментальных значений амплитуд колебаний можно будет считать доказанным наличие расчетной силовой характеристики с участком квазинулевой жесткости у лабораторного стенда.

Дифференциальное уравнение (6) описывает вынужденные колебания поршня и штока и имеет вид:

 $m'\ddot{x} = F_0 \cos[pt] - (F_{\Sigma}[x - x0] - m'g) - F_{TT} sign[\dot{x}],$  (6)

где p – частота вынужденных колебаний;  $F_0$  – амплитуда возмущающей силы;  $F_{_{\rm Tp}}$ =4 H – сила сухого трения.

Дифференциальное уравнение (6) решали численным методом. Решения дифференциального уравнения (6) при  $m'\approx15,200$  кг;  $F_{\rm rp}=4$  H и частоте вращения p=30 с<sup>-1</sup> (a, b, c,  $\partial$ , e) и p=50 с<sup>-1</sup> (b) представлены на рис. 8. Из-за наличия сил сухого трения вынужденные колебания оказались невозможны при любом значении  $F_0$ . Как следует из рис. 8, колебания появляются только при  $F_0=8$  H на частотах p=30 с<sup>-1</sup> и p=50 с<sup>-1</sup>.

Возмущающая сила в предлагаемом лабораторном стенде получена благодаря эксцентрику длиной e, который вращается с постоянной угловой скоростью p, изменяющейся в широком диапазоне с помощью двигателя постоянного тока. Силы инерции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  определяют амплитуду возмущающей силы  $F_0$ . Силу инерции  $\Phi_1$  прикладывают к центру эксцентрика – 1; силу инерции  $\Phi_2$  – в центр стержня – 2 (рис. 9).



Рис. 8. Решения дифференциального уравнения (6)

Fig. 8. Solutions of the differential equation (6)



- Рис. 9. Эксцентрик: 1 эксцентрик; 2 стержень; т<sub>1</sub> масса эксцентрика; т<sub>2</sub> – масса стержня; е – эксцентриситет (длина стержня); р – постоянная угловая скорость вращения эксцентрика
- Fig. 9. Eccentric: 1 is the eccentric; 2 is the rod;  $m_1$  is the eccentric weight;  $m_2$  is the rod weight; e is the eccentricity (rod length); p is the constant angular velocity of eccentric rotation

Сумму сил инерции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , равную амплитуде возмущающей силы  $F_0$ , записывают как:

$$F_0 = \Phi_1 + \Phi_2 = m_1 p^2 e + m_2 p^2 e / 2 = p^2 e (m_1 + m_2 / 2),$$

где  $\Phi_1 = m_1 p^2 e$  – сила инерции, действующая на эксцентрик;  $\Phi_2 = m_2 p^2 e/2$  – сила инерции, действующая на стержень. Дифференциальное уравнение (6) в таком случае имеет вид:

$$m'\ddot{x} = p^{2}e(m_{1} + m_{2}/2)\cos[pt] - (F_{\Sigma}[x - x0] - m'g) - F_{TD}sign[\dot{x}],$$
(7)

Теоретическая зависимость координаты перемещения поршня от времени, представленная на рис. 10, получена решением дифференциального уравнения (7).

Из рисунка видно, что при одинаковых значениях эксцентриситета (e=10 мм) и суммы ( $m_1+m_2/2$ )=0,100 кг амплитуда колебаний почти не зависит от частоты. Размах колебаний замерялся экспериментально. Замеры осуществлялись визуально с использованием измерительного устройства – 21 (маркер), представленного на рис. 1. Погрешность этих измерений составила 0,5 мм.

Чтобы получить расчетные амплитуды возмущающих сил  $F_0=150$  H,  $F_0=30$  H и  $F_0=50$  H при p=30 с<sup>-1</sup> (рис. 8, *г*-*e*), выбрали следующие величины эксцентриситета *e* и масс  $(m_1+m_2/2)$ : для  $F_0=15$  H:  $(m_1+m_2/2)=0,100$  кг; величина эксцентриситета – 0,1670 м; для  $F_0=30$  H:  $(m_1+m_2/2)=0,200$  кг; величина эксцентриситета – 0,1660 м; для  $F_0=50$  H:  $(m_1+m_2/2)=0,300$  кг; величина эксцентриситета – 0,1850 м.

Результаты замера амплитуды колебаний трех независимых значений амплитуды возмущающей силы ( $F_0=15$  H;  $F_0=30$  H;  $F_0=50$  H) на частоте p=30 с<sup>-1</sup> совпали с теоретическими с погрешностью 0,5 мм. Это доказало правильность результатов, полученных теоретическим путем.

#### Заключение

Разработана лабораторная установка, имеющая силовую характеристику с участком квазинулевой жесткости для оценки теоретических результатов. Основным исследуемым элементом лабораторной установки является пневматическая пружина, внутри которой расположен пакет из пяти последовательно установленных тарельчатых пружин.

Экспериментально подобраны параметры тарельчатых пружин таким образом, чтобы получить силовую характеристику с участком квазинулевой жесткости при заданном давлении в подпоршневой полости цилиндра.

Исследована силовая характеристика пневмокомпенсатора с квазинулевой жесткостью электроцентробежного погружного насоса. Получена силовая характеристика пакета последовательно соединенных тарельчатых пружин, имеющая участок с отрицательной жесткостью.



Рис. 10. Колебания поршня установки при значениях возмущающей силы в виде F<sub>0</sub>=p<sup>2</sup>e(m<sub>1</sub>+m<sub>2</sub>/2), полученные решением дифференциального уравнения (7): e=10 мм – эксцентриситет; (m<sub>1</sub>+m<sub>2</sub>/2)=0,100 кг; а) p=30 с<sup>-1</sup>, размах колебаний ≈1,1 мм; б) p=50 с<sup>-1</sup>, размах колебаний ≈1,5 мм

Fig. 10. Oscillations of the installation piston with the values of the disturbing force in the form of  $F_0=p^2e(m_1+m_2/2)$ , obtained by solving the differential equation (7):  $e=10 \text{ mm} - eccentricity}$ ;  $(m_1+m_2/2)=0,100 \text{ kg}$ ; a)  $p=30 \text{ s}^{-1}$ , vibration swing  $\approx 1,1 \text{ mm}$ ; 6)  $p=50 \text{ s}^{-1}$ , vibration swing  $\approx 1,5 \text{ mm}$ 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исследование эффективности поршневого компенсатора УЭЦН с квазинулевой жесткостью. Ч. 2: Характеристика пневмокомпенсатора с квазинулевой жесткостью / Е.Б. Думлер, А.Н. Зотов, К.Р. Уразаков, Р.И. Вахитова // Нефтегазовое дело: науч. журн. УГНТУ. – 2017. – Т. 15. – № 3. – С. 112–119.
- Думлер Е.Б., Зотов А.Н, Уразаков К.Р. Моделирование работы пневмокомпенсатора с квазинулевой жесткостью в установке электропогружного центробежного насоса // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 70–76.
- Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы. М.: Недра, 1988. – 501 с.
- Valeev A.R., Zotov A.N., Tashbulatov R.R. Experimental study of low frequency vibration isolator with quasi-zero stiffness // Proc. of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Sound and Vibration. – Athens, Greece, 2016. – P. 1–7.
- Zotov A.N., Valeev A.R., Harisov Sh.A. Application of Disk Springs for Manufacturing Vibration Isolators with Quasi-Zero Stiffness // Chemical and Petroleum Engineering. - 2015. -V. 51. - № 3. - P. 194-200.
- Adaptive negative stiffness: a new structural modification approach for seismic protection / D. Pasala, A. Sarlis, S. Nagarajaiah, D. Taylor // Journal of structural Engineering. 2013. V. 139. № 7. P. 1112-1123.
- Carrella A., Friswell M.A. A passive vibration isolator incorporating a composite bistable plate // IPACS Open Access Electronic Library. 6<sup>th</sup> Euromech Nonlinear Dynamics Conference, ENOC. – St. Peterburg, 2008.
- 8. Carrella A. Passive vibration isolators with high-static-low-dynamic-stiffness: Ph.D. Thesis. – Soton, 2008. – 226 p.
- Ibrahim R.A. Recent advances in nonlinear passive vibration isolators // Journal of Sound and Vibration. - 2008. - V. 314. -№ 3-5. - P. 371-452.

- Le T.D., Ahn K.K. A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiff-ness structure for vehicle seat // Journal of Sound and Vibration,. - 2011. - V. 330. -№ 26. - P. 6311-6335.
- Liu X., Huang X., Hua H. On the characteristics of a quasi-zero stiffness isolator using Euler buck-led beam as negative stiffness corrector // Journal of Sound and Vibration. - 2013. - V. 332. -№ 14. - P. 3359-3376.
- Mizuno T., Toumiya T., Takasaki M. Vibration Isolation System Using Negative Stiffness // JSME International Journal, Series C. – 2003. – V. 46. – № 3. – P. 807–812.
- Wang Y.C., Lakes R.S. Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements // American Journal of Physics. 2004. V. 72. № 1. P. 40-50.
- Valeev A.R., Kharisov Sh. Application of Vibration Isolators with a Low Stiffness for the Strongly Vibrating Equipment // Procedia Engineering. - 2016. - V. 150. - P. 641-646.
- Алабужев П.М., Гритчин А.А., Ким Л.И. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью / под ред. К.М. Рагульскиса. – Л.: Машиностроение, 1986. – 96 с.
- Скважинная насосная установка: пат. Рос. Федерация № 2641812; заявл. 20.02.2017; опубл. 22.01.2018. Бюл. № 3. – 14 с.
- 17. Flex пластик REC URL: https://rec3d.ru/shop/plastik-dlya-3dprinterov/flex/flex-plastik-rec-1-75mm-rozovyj/ (дата обращения: 15.09.2017).
- Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. – 232 с.
- Ногид Л.М. Теория подобия и размерностей. Л.: Судпромгиз, 1959. – 98 с.
- Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов: 2 изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.

Поступила 19.04.2018 г.

## Информация об авторах

Зотов А.Н., доктор технических наук, профессор кафедры механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

*Думлер Е.Б.*, соискатель кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

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

*Вахитова Р.И.*, кандидат технических наук, доцент кафедры электро- и теплоэнергетики Альметьевского государственного нефтяного института.

Думлер О.Ю., инженер-механик, директор по качеству и логистике промышленного предприятия по производству ЭЦН ООО «Новые технологии».

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

#### UDC 622.276.53.054.23:621.67-83

## EXPERIMENTAL STUDIES OF OPERATION OF A PNEUMATIC SPRING PRESSURE COMPENSATOR WITH QUASI-ZERO STIFFNESS

Alexey N. Zotov<sup>1</sup>,

a-zot2@yandex.ru

Elena B. Dumler<sup>1</sup>, dumler08@mail.ru

## Kamil R. Urazakov<sup>1</sup>,

UrazakK@mail.ru

Roza I. Vakhitova<sup>2</sup>, roza-w@mail.ru

**Oleg Yu. Dumler**<sup>3</sup>, mail@ntehn.ru

# Pavel M. Tugunov<sup>1</sup>,

info@rusoil.net

<sup>1</sup> Ufa State Oil Technical University,1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

<sup>2</sup> Almetyevsk State Oil Institute,2, Lenin street, Almetyevsk, 423450, Russia.

<sup>3</sup> LLC «New Technologies», 168 c, Karl Marx street, Chistopol, 422980, Russia.

**The relevance** of the research is caused by vibration negative effect on the elements in the installation of the electric centrifugal pump. The presence of vibration increases the number of premature failures. One of the reasons for the vibrational effects on the electric centrifugal pump unit is the pressure drop at the pump discharge, and the frequencies of such fluctuations are small.

**The main aim** of the research is to develop a laboratory installation simulating oscillatory processes occurring on the discharge line of an electric centrifugal submersible pump in a well.

**Objects:** a model of a pneumatic spring pressure compensator with quasi-zero stiffness, structurally representing a pneumatic spring, inside of which there is a package of five sequentially installed disc springs.

**Methods:** numerical solutions of differential equations; theory of oscillations, mathematical analysis, mathematical statistics, methods of mathematical modeling.

**Results.** To confirm the theoretical results obtained by calculation the authors have developed the laboratory facility, which allows studying the system with quasi-zero stiffness. This is a set of pneumatic spring having a force characteristic with a working area of positive stiffness and a package of sequentially connected disc springs having a force characteristic with a working area of negative stiffness. The parameters of the disk springs were experimentally selected in such a way as to obtain a power characteristic with a region of quasi-zero stiffness at a given pressure in the cylinder sub-piston cavity. To ensure the necessary stability of the system to small changes with the help of the analysis of power characteristics, an optimum number of disk springs is obtained. The authors investigated the power characteristic of a pneumatic compensator with quasi-zero stiffness on the discharge line of an electric centrifugal submersible pump. The result of the research on the laboratory installation was the coincidence with the given error of the oscillation amplitude measurements and theoretically predicted results, which allowed proving the correctness of theoretical conclusions.

#### Key words:

*Electric submersible pump, laboratory installation, pneumatic spring pressure compensator, pneumocompensator, pneumospring, quasi-zero stiffness, negative stiffness, dish-shaped springs.* 

## REFERENCES

- Investigation of the ESP piston compensator efficiency with quasi-zero rigidity. Part 2: Characteristics of the pneumatic compensator with quasi-zero rigidity / E.B. Dumler, A.N. Zotov, K.R. Urazakov, R.I. Vakhitova. *Oil and gas business: scientific: journal UGNTU*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 112–119. In Rus.
- Dumler E.B., Zotov A.N., Urazakov K.R. Simulation of the work of a pneumatic compensator with quasi-zero rigidity in an electric submersible centrifugal pump installation. *Notes of the Mining Institute*, 2018, vol. 229, pp. 70–76. In Rus.
- 3. Bagramov R.A. *Burovye mashiny i kompleksy* [Drilling machines and complexes]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 501 p.
- Valeev A.R., Zotov A.N., Tashbulatov R.R. Experimental study of low frequency vibration isolator with quasi-zero stiffness. Proc. of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Sound and Vibration. Athens, Greece, 2016. pp. 1–7.
- Zotov A.N., Valeev A.R., Harisov Sh.A. Application of Disk Springs for Manufacturing Vibration Isolators with Quasi-Zero Stiffness. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 194-200.

- Pasala D., Sarlis A., Nagarajaiah S., Taylor D. Adaptive negative stiffness: a new structural modification approach for seismic protection. *Journal of structural Engineering*, 2013, vol. 139, no. 7, pp. 1112–1123.
- Carrella A., Friswell M.A. A passive vibration isolator incorporating a composite bistable plate. *IPACS Open Access Electronic Library.* 6<sup>th</sup> Euromech Nonlinear Dynamics Conference, ENOC. St. Petersburg, 2008.
- 8. Carrella A. Passive vibration isolators with high-static-low-dynamic-stiffness. Ph.D. Thesis. Soton, 2008. 226 p.
- Ibrahim R.A. Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, vol. 314, no. 3–5, pp. 371–452.
- Le T.D., Ahn K.K. A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiff-ness structure for vehicle seat. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, no. 26, pp. 631-635.
- Liu X., Huang X., Hua H. On the characteristics of a quasi-zero stiffness isolator using Euler buck-led beam as negative stiffness corrector. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, vol. 332, no. 14, pp. 3359–3376.
- Mizuno T., Toumiya T., Takasaki M. Vibration Isolation System Using Negative Stiffness. JSME International Journal, Series C, 2003, vol. 46, no. 3, pp. 807–812.
- Wang Y.C., Lakes R.S. Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements. *American Journal of Physics*, 2004, vol. 72, no. 1, pp. 40-50.
  - Information about the authors

Alexey N. Zotov, Dr. Sc., professor Ufa State Oil Technical University.

Elena B. Dumler, graduate student, Ufa State Oil Technical University.

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Oil Technical University.

Roza I. Vakhitova, Cand. Sc., associate professor, Almetyevsk State Oil Institute.

*Oleg Yu. Dumler*, engineer-mechanic, director of quality and logistics, LLC «New Technologies» LLC «New Technologies».

Pavel M. Tugunov, graduate student, Ufa State Oil Technical University.

- Valeev A.R., Kharisov Sh. Application of Vibration Isolators with a Low Stiffness for the Strongly Vibrating Equipment. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 641–646.
- Alabuzhev P.M., Gritchin I.I. Kim L.I. Vibrozashchitnye sistemy s kvazinulevoy zhestkostyu [Vibroprotective system with quasizero stiffness]. Ed. by K.M. Ragulskis. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 96 p.
- Urazakov K.P., Dumler E.B., Zotov A.N., Dumler O.Yu. Skvazhinnaya nasosnaya ustanovka [Downhole pump installation]. Patent RF, no. 2641812, 2018.
- Flex plastic REC. Available at: https://rec3d.ru/shop/plastikdlya-3d-printerov/flex/flex-plastik-rec-1-75mm-rozovyj/ (accessed 15 September 2017).
- Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara [Introduction to the theory of mechanical blow]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 232 p.
- Nogid L.M. *Teoriya podobiya i razmernostey* [The theory of similarity and dimensions]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1959. 98 p.
- Andreeva L.E. Uprugie elementy i pribory [Elastic elements and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 391 p.

Received: 19 April 2018.

УДК 550.424.4

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТИПЫ ВОД ХВОСТОХРАНИЛИЩ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

## Чечель Лариса Павловна<sup>1</sup>,

lpchechel@mail.ru

## Замана Леонид Васильевич<sup>1</sup>,

l.v.zamana@mail.ru

<sup>1</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672014. г. Чита, vл. Недорезова, 16<sup>a</sup>.

**Актуальность** обсуждаемой темы обусловлена необходимостью решения задачи сохранения качества водных ресурсов в условиях воздействия горного производства.

**Цель:** изучение химического состава техногенно-трансформированных вод в районах отработки трех свинцово-цинковых месторождений Забайкалья и их геохимическая типизация.

**Объекты:** воды, формирующиеся в пределах хвостохранилищ Благодатского, Акатуевского и Кадаинского свинцово-цинковых месторождений, расположенных в Восточном Забайкалье.

**Методы.** Концентрации анионов измерялись турбидиметрическим, потенциометрическим, колориметрическим методами; катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Для определения состава равновесных вторичных минеральных фаз применялись диаграммы полей устойчивости алюмосиликатных минералов, построенные по методу, предложенному Р.М. Гаррелсом и Ч.Л. Крайстом.

**Результаты.** По соотношению основных ионов рассматриваемые воды относятся к гидрокарбонатному, сульфатно-гидрокарбонатному, гидрокарбонатно-сульфатному и сульфатному магниево-кальциевому и кальциево-магниевому химическим типам. Дренажные стоки свинцово-цинковых месторождений характеризуются значительным превышением содержаний металлов (As, Zn, Cd, Pb, Sb, Mn, Mo, U, La) над средним составом вод выщелачивания, с максимумом для мышьяка более чем в 800 раз и цинка – в 200 раз. Характер расположения точек состава вод на диаграммах устойчивости алюмосиликатных минералов свидетельствует об их насыщении относительно глинистых алюмосиликатов и кальцита, что с учетом особенностей их химического состава позволяет говорить о принадлежности последних к двум геохимическим типам – кремнисто-кальциево-магниевому и кремнистому карбонатно-кальциевому, ведущая роль в смене которых принадлежит интенсивности водообмена. Типизация аномальных гидрогеохимических полей в горнодобывающих регионах направлена на совершенствование эколого-геохимического мониторинга природных вод и может использоваться при разработке мероприятий по предотвращению загрязнения и очистке вод.

#### Ключевые слова:

Свинцово-цинковые месторождения, техногенные воды, хвостохранилища, минеральные равновесия, геохимический тип.

#### Введение

Последняя четверть XX в. отмечена началом активного количественного изучения водной миграции поллютантов в районах горной добычи. Ученые разных стран стали изучать проблему загрязняющего влияния складированных отходов добычи и переработки руд, дренажных стоков горных выработок на качество природных вод. При этом наиболее опасными были признаны отходы, содержащие сульфидные минералы [1]. Было установлено, что кислые дренажные стоки рудников содержат аномальные количества тяжелых металлов, оказывающих негативное воздействие на биотические компоненты ландшафта. Концентрации свыше 100 мг/л Al, Zn, Cd, Fe и других металлов, значительный рост концентрации сульфатов, высокие содержания взвешенных частиц отмечаются в кислых сточных водах отработанных медных и свинцово-цинковых рудников в Македонии [2]. Кислотными дренажами угольных и золоторудных месторождений, характеризующихся увеличением концентрации сульфатов в среднем до 3,5 г/л и значительным ростом содержаний железа и других тяжелых металлов, загрязняются речные системы Южной Африки [3], повышенные содержания мышьяка и сурьмы в водах и донных отложениях рек стали следствием золотодобычи на гигантском руднике Йеллоунайф (Канада) [4]. Отработка месторождений таких известных угледобывающих регионов, как Донецкий и Кузбасский угольные бассейны, способствует формированию шахтных дренажей с максимальной минерализацией до 17 г/л, SO<sub>4</sub> – 12 г/л, Na – 3,4 г/л, Mg – 1,2 г/л, Fe – 0,5 г/л, Mn – 0,07 г/л [5, 6]. Подотвальные дренажи и воды хвостохранилища Тасеевского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье) характеризуются ростом концентраций (г/л): SO<sub>4</sub> – до 5,54; Al – до 0,15; Fe – до 0,77; Mn – до 0,09, а также минерализации – до 7,30 г/л [7].

Негативное воздействие отработки месторождений на окружающую среду, помимо загрязнения подземных и поверхностных вод, проявляется в виде нарушения земной поверхности, загрязнения атмосферного воздуха, заболачивания и деградации почв, истощения растительности и загрязнения ее токсичными компонентами. Добыча ртути в округе Сюшань (Чунцин, Юго-Западный Китай) [8] представляет серьезную проблему в связи с загрязнением ртутью речных вод, почв и риса, являющегося одним из основных продуктов питания местного населения. Установлено сильное загрязнение сельскохозяйственных культур (овес, горох, редис) токсичными элементами, относящимися, согласно СанПиН 2.1.71287–03 [9], к первому (Pb, As), второму (Cu, Co, Mo) и третьему (W) классам опасности в г. Закаменск (Западное Забайкалье), на территории которого размещено горнообогатительное производство Джидинского W-Мо комбината [10].

Немалую угрозу представляют также нейтральные и щелочные рудничные стоки, формирующиеся в случае карбонатного состава вмещающих пород. Содержания Pb, Zn и Cd в таких водах невысоки, но большую подвижность проявляют анионогенные высокотоксичные элементы, включающие As, Sb, Se и Mo [2, 11–13].

Восточное Забайкалье – старейший горнорудный регион России, освоение рудных месторождений в нем начато с разработки серебряно-свинцовых руд и относится к 17 в. Здесь впервые в России были добыты свинец, цинк, серебро, олово, флюорит, молибден, вольфрам. В Забайкальском крае известно несколько десятков месторождений цинка и свинца, многие из которых отрабатывались в прошлом либо отрабатываются в настоящее время. Прилегающие к рудникам территории покрыты горными выработками, породными отвалами и хвостами обогатительных фабрик. Токсичные компоненты, поступая в окружающую среду, загрязняют все элементы ландшафтов и в первую очередь природные воды. В связи с этим изучение особенностей химического состава и степени техногенного преобразования вод, формирующихся в таких районах, несомненно, актуально и имеет важное практическое значение в решении задачи сохранения окружающей среды.

#### Объекты и методы исследований

В 2013 и 2015 гг. было проведено гидрогеохимическое опробование трех разрабатывавшихся ранее свинцово-цинковых месторождений – Бла-



**Рис. 1.** Местоположение объектов исследования и пункты их опробования. Хвостохранилища: а) Благодатского; б) Акатуевского; в) Кадаинского месторождений

Fig. 1. Location of the objects of research and their testing points. Tailings of: a) Blagodatskoe; b) Akatuevskoe; c) Kadainskoe deposits

годатского, Акатуевского и Кадаинского, расположенных в пределах Приаргунского полиметаллического пояса (С.С. Смирнов, 1932) в юго-восточной части Забайкальского края (рис. 1).

На Благодастком месторождении были опробованы воды ручья Малый Зерентуй, в долине которого в период отработки месторождения располагалось хвостохранилище. Пробы отбирались выше хвостохранилища, в его центральной и нижней частях и под нижней дамбой, замыкающей хвостохранилище (рис. 1, a). На Акатуевском месторождении были опробованы воды дренажа штольни в западном борту хвостохранилища, которые затем растекаются по его поверхности и далее фильтруются через пески хвостохранилища, и выхода фильтрационных вод под его нижней дамбой (рис. 1,  $\sigma$ ). На Кадаинском месторождении опробован пруд хвостохранилища в его нижней части (рис. 1,  $\sigma$ ).

Рассматриваемые свинцово-цинковые месторождения относятся к рудной формации галенитсфалерит-карбонатно-кварцевой метасоматических залежей и карбонатных пород нижнепалеозойского возраста [14, 15]. Рудные тела месторождений залегают среди карбонатных пород нижнего палеозоя (доломиты и известняки, переслаивающиеся с алевролитами и аргиллитами) и локализуются в контактах карбонатных и алюмосиликатных пород и внутри карбонатных пород, в местах пересечения разломов. В первом случае они, как правило, представлены согласными пластообразными залежами, во втором - штоками и линзами. В составе жильных минералов большую роль играют различные карбонаты – доломит, анкерит, кальцит. Среди типов полиметаллических руд преобладают пирит-галенит-сфалеритовый (Благодатское месторождение) и галенит-сфалеритовый (Кадаинское и Акатуевское месторождения).

Химико-аналитические исследования водных проб выполнялись в аттестованной лаборатории Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита) общепринятыми методами: потенциометрией, колориметрией, турбидиметрией. Определение концентраций металлов проводилось атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно выполнялся анализ водных проб методом ICP-MS в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

При выделении геохимических типов вод за основу принята классификация, предложенная С.Л. Шварцевым [16], построенная на принципе существования строгой парагенетической зависимости между составом водного раствора и вторичной минеральной фазы, формируемой этими водами на каждой ступени развития системы «вода-порода». Для определения равновесных минеральных фаз в работе применялись диаграммы полей устойчивости минералов, построенные по методу, предложенному Р.М. Гаррелсом и Ч.Л. Крайстом [17].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Данная работа является продолжением и развитием исследований, изложенных в более ранних публикациях [18 и др.], в которых были освещены особенности химического состава вод полиметаллических месторождений и приведены результаты расчетов неорганических форм миграции компонентов.

Воды месторождений, несмотря на преимущественно сульфидный состав руд, характеризуются нейтральными и слабощелочными значениями pH (табл. 1), что обусловлено высоким нейтрализующим потенциалом вмещающих карбонатных пород и минералов, присутствующих в рудах. По степени минерализации воды преимущественно пресные. Исключением является пруд Кадаинского хвостохранилища (сумма ионов 1,8 г/л), отсутствие стока из которого определяло более продолжительное время взаимодействия воды с кеком хвостохранилища и способствовало возрастанию доли испарительного концентрирования в росте ее минерализации.

Таблица 1. Физико-химические параметры состава вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Юго-Восточного Забайкалья (мг/л)

 Table 1.
 Physical and chemical parameters of water composition of lead-zinc deposits tailings (mg/l)

		Номер пробы/Sample number						
Параметр Parameter	F3-13-1	F3-13-2	F3-13-3	Γ3-13-4	CB-13-10	AK-15-1	AK-15-2	
pH	7,70	8,04	8,26	8,30	7,80	7,58	7,25	
Eh, mV	295	-	293	255	262	220	-92	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	215,0	216,0	204,0	448,0	73,2	281,2	262,9	
$SO_4^{2-}$	33,0	73,5	111,3	107,5	1150	307,5	478,2	
Cl-	2,20	2,30	2,20	2,00	3,70	1,52	1,60	
F-	0,21	0,20	0,21	0,21	0,72	0,36	0,49	
$NO_2^-$	0,012	0,012	0,014	0,015	0,013	0,011	0,012	
NO <sub>3</sub> -	0,62	0,58	0,53	1,15	<0,62	0,31	1,49	
$\rm NH_4$	0,29	0,26	0,20	0,20	0,13	0,15	0,28	
Ca <sup>2+</sup>	74,7	57,0	69,3	86,8	459,2	147,7	155,1	
$Mg^{2+}$	2,32	24,4	26,2	58,9	112,5	43,3	42,9	
$Na^+$	5,02	4,82	4,67	6,47	16,2	7,25	12,8	
$\mathbf{K}^+$	0,96	0,91	1,05	0,67	5,73	1,21	4,49	
Si	5,13	4,96	4,69	3,31	1,10	6,65	10,3	
Σионов Σions	333,4	379,1	418,9	710,6	1821	789,7	958,0	
ПО, мг О <sub>2</sub> /л РО, mg O <sub>2</sub> /l	6,82	6,30	5,35	11,2	2,42	0,58	1,48	
$P_{\text{ob.}}/P_{\text{total}}$	0,058	0,058	0,062	0,06	0,78	0,078	0,13	

Примечание: ПО – окисляемость перманганатная; ГЗ – Благодатское, СБ – Кадаинское, АК – Акатуевское месторождения; Σионов – минерализация.

Note: PO – permanganate oxidation;  $\Gamma 3$  – Blagodatskoe, CE – Kadainskoe, AK – Akatuevskoe deposits;  $\Sigma ions$  – water mineralization.

После прохождения вод через пески Благодатского и Акатуевского хвостохранилищ фиксируется заметное обогащение их ионами сульфатов, гидрокарбонатов, магния и другими (табл. 1), что ведет к росту минерализации в 2,1 и 1,2 раза соответственно и к смене химического состава. Так, формулы химического состава имели вид:

из ручья на входе в Благодатское хвостохранилище –

$$M0.33 \frac{HCO_{3}82SO_{4}16C11}{Ca90Mg5Na5} pH7.70;$$

• на выходе –

 из штольни перед Акатуевским хвостохранилищем –

M0.79 
$$\frac{SO_458HCO_342}{Ca65Mg32Na3}$$
 pH7.58;

• на выходе –

$$M0.96 \frac{SO_4 69HCO_3 30}{Ca65Mg 30Na5} pH7.25.$$

Изменения значений pH при этом имели разнонаправленный характер – возрастали при прохождении вод через пески Благодатского и понижались при прохождении через пески Акатуевского хвостохранилищ (табл. 1). Формула химического состава вод пруда Кадаинского хвостохранилища

имела вид: M1.82  $\frac{SO_495HCO_35}{Ca69Mg28Na2}$  pH7.80. Этим во-

дам характерны максимальные из изученных концентрации макрокомпонентов и минерализации (табл. 1).

Миграция тяжелых металлов в нейтральных и щелочных средах ограничена низкой растворимостью их гидроксидов, что отражается на содержаниях этих компонентов в водах. Максимальные концентрации металлов, достигающие миллиграммовых значений, фиксируются в редких случаях, составляя, как правило, первые десятки, единицы и менее мкг/л (табл. 2). В отличие от рассматриваемых вод в кислых сульфатных дренажных стоках вольфрамовых, молибденовых и золоторудных месторождений, залегающих в алюмосиликатных породах, были установлены содержания металлов на уровне единиц, десятков и сотен мг/л [7, 19].

Выяснение геохимической специфики природных вод, оценка их экологического состояния осуществляется, как правило, посредством сравнения показателей состава вод с кларками гидросферы (кларки речных и морских вод либо вод оз. Байкал), предельно-допустимыми (ПДК) или фоновыми показателями [20–22].

В данной работе нами применена нормализация данных их химического анализа относительно среднего состава вод выщелачивания [23]. Наибольшие превышения концентраций компонентов над средним составом вод выщелачивания свойственны металлам, относящимся к группе рудообразующих элементов рассматриваемых месторождений – Zn, Pb, Fe, As (табл. 2). Максимальные превышения зафиксированы для мышьяка (>800 раз) в линейной разгрузке вод под нижней дамбой Акатуевского хвостохранилища, а также цинка (>200 раз) и кадмия (почти в 100 раз) в водах пруда хвостохранилища Кадаинского месторождения (рис. 2, б).

Таблица 2.	Концентрации металлов в водах хвостохранили
	свинцово-цинковых месторождений (мкг/л)

 Table 2.
 Metal concentrations in the waters of tailings ponds of lead-zinc deposits  $(\mu g/l)$ 

Параметр		Н	омер про	бы/San	ple numb	er	
Parameter	ГЗ-13-1	ГЗ-13-2	ГЗ-13-3	ГЗ-13-4	СБ-13-10	АК-15-1	АК-15-2
Li	6,70	7,30	7,30	10,1	29,0	11,5	11,9
Be	0,13	0,015	0,0091	0,017	0,0029	0,030	0,016
Al	945,0	28,0	18,0	174,0	14,2	38,0	19,0
Sc	0,14	0,0088	0,006	0,020	0,019	0,033	0,02
Ti	7,30	0,46	0,25	3,33	0,27	1,22	0,63
V	1,96	0,51	0,14	0,86	0,03	0,24	0,22
Cr	1,28	0,52	0,39	0,43	0,64	0,13	0,15
Mn	37,0	54,0	220,0	49,0	1106	17,0	2361
Fe	852,0	88,0	177,0	269,0	87,0	66,0	8435
Ni	1,76	2,99	2,28	1,46	11,8	7,20	2,10
Co	0,51	0,40	0,44	0,24	3,61	0,09	1,05
Cu	2,05	5,30	13,8	0,50	3,51	3,30	2,00
Zn	53,0	412,0	982,0	2,82	7846	2111	425,0
Ga	0,25	0,02	0,04	0,04	0,10	0,01	0,14
As	18,0	28,0	99,0	2,79	7,50	60,0	1097
Se	0,16	0,11	0,30	0,34	0,18	1,51	0,06
Br	7,90	10,4	8,60	12,6	41,0	7,80	7,50
Rb	1,37	0,64	0,57	0,50	13,8	3,11	2,70
Sr	212,0	226,0	241,0	369,0	2526	567,0	1148
Zr	0,28	0,13	0,09	0,36	0,02	0,03	0,08
Nb	0,02	0,004	0,002	0,01	0,002	0,004	0,004
Mo	4,57	6,60	6,10	0,23	2,21	3,07	5,90
Ag	0,004	0,08	0,06	0,002	0,03	0,04	0,008
Cd	0,18	1,02	2,66	0,009	19,0	1,70	0,68
Sb	2,46	8,60	25,0	0,56	19,0	3,36	0,91
Cs	0,10	0,07	0,022	0,02	0,35	0,73	0,14
Ba	27,0	25,0	27,0	31,0	21,0	8,30	67,0
La	0,98	0,07	0,04	0,18	0,02	0,06	0,07
Pb	7,90	42,0	150,0	0,19	57,0	2,56	14,4
Th	0,05	0,007	0,005	0,02	0,008	0,01	0,01
U	0,85	0,88	0,77	1,62	0,45	4,52	1,01

Ряды распределения компонентов относительно среднего состава вод выщелачивания в порядке их убывания имеют вид: As>Pb>Sb>Zn>Cd>Mn>Mo>Al>La>Sr>Cu>U – на Благодатском, <math>As>Zn>Mn>Fe>Sr>Cd>U>Pb>Sb>Mo>Cs>Se> Co – на Акатуевском (рис. 2,*a*), Zn>Cd>Mn>Sb>Sr>Pb>Co>As>Ni>Rb>Li>Cs>Mo – на Кадаинском хвостохранилищах (рис. 2,*б*).

Положение данных химического состава техногенных вод на диаграммах полей устойчивости минералов показало их насыщенность относительно вторичных минеральных образований – каолинита, монтмориллонита, иллита, кальцита и одновременно их ненасыщенность относительно минералов первичных алюмосиликатных пород, за исключением Mg-хлорита (рис. 3).



Рис. 2. Нормированные относительно среднего химического состава вод выщелачивания значения концентраций металлов в водах хвостохранилищ: а) Благодатского (ГЗ); б) Кадаинского (СБ) и Акатуевского (АК) месторождений

Fig. 2. Contents of metals normalized relative to the average chemical composition of the leaching waters in tailings of: a) Blagodatskoe (Γ3); b) Kadainskoe (CE) and Akatuevskoe (AK) deposits

Точки состава вод на диаграммах для кальцие вых и магниевых минералов располагаются преимущественно в полях устойчивости кальцита, хлорита и монтмориллонита (рис. 3, *a*, *б*); на диаграммах для натриевых и калиевых минералов – в полях устойчивости каолинита и иллита (рис. 3, *в*, *г*). Равновесие с кальцитом и хлоритом в большей степени свойственно водам Благодатского и Кадаинского, с Са- и Мд-монтмориллонитом – водам Акатуевского хвостохранилищ (рис. 3, *a*, *б*). К равновесию с каолинитом и иллитом склонны преимущественно воды, формирующиеся в отложениях Благодатского и Акатуевского хвостохранилищ (рис. 3, e, z). На двух диаграммах точки состава вод пруда Кадаинского хвостохранилища расположены в поле устойчивости гиббсита (рис. 3, e, z), что определяется пониженной активностью в растворе кремния. Тем не менее, благодаря способности алюминия к формированию устойчивых растворимых элементоорганических соединений, образование гиббсита маловероятно [24]. Преимущественно карбонатный состав вмещающих оруденение отложений, а также присутствие карбонатных минералов в составе рудных тел способствуют бы-



строму насыщению вод ионами CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> и достижению их равновесия с кальцитом. Поступление компонентов в раствор происходит в результате гидролиза алюмосиликатных и растворения карбонатных пород.

Анализ данных по составу исследованных вод и характеру минерального равновесия позволяет говорить об их принадлежности к двум геохимическим типам – кремнисто-кальциево-магниевому и кремнистому карбонатно-кальциевому (табл. 3).

Таблица 3. Геохимические типы техногенных вод свинцово-цинковых месторождений

Table 3.	Geochemical types of technogenic waters of lead-zinc de-
	posits

Геохимический тип Geochemical type	Необходимое химическое условие Required chemical condition	Основные параметры состава вод Main parameters of water composition
Кремнисто- кальциево- магниевый Silicon-calcium- magnesium	Равновесие с монтмориллонитом, иллитом Equilibrium with montmorillonite, illite	Слабощелочные, пресные Alkalescent with low water salinity; pH=7,9; Eh=196; SiO <sub>2</sub> =10,7; $\Sigma$ ионов/ $\Sigma$ ions= =432 мг/л (mg/l)
Кремнистый карбонатно- кальциевый Siliceous carbonate-calcium	Равновесие с кальцитом и глинами Equilibrium with calcite and clays	Околонейтральные и слабощелочные, пресные и солоноватые Neutral and slightly alkaline with low and eleva- ted water salinity; pH=7,66; Eh=132; SiO <sub>2</sub> =14,5; Σионов/ Σions=1058 мг/л (mg/l)

Более высокая скорость водообмена и, как следствие, меньшая соленость вод (<0,6 г/л) ручья Мал. Зерентуй, дренирующего Благодатское хвостохранилище, а также стока штольни Акатуевского месторождения позволяют отнести их к кремнисто-кальциево-магниевому геохимическому типу. Химический состав их преимущественно гидрокарбонатный и сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый. Это околонейтральные и слабощелочные воды (pH 7,4–8,3) с минерализацией, варьирующей в пределах 0,33–0,53 г/л. Равновесный с этими водами вторичный минеральный комплекс представлен Са- и Мg-монтмориллонитом и иллитом.

В остальных случаях воды отнесены к кремнистому карбонатно-кальциевому геохимическому типу с величиной минерализации >0,7 г/л, представленному тремя пунктами наблюдений – ручей Мал. Зерентуй ниже Благодатского, выход фильтрационных вод под нижней дамбой Акатуевского и пруд Кадаинского хвостохранилищ (табл. 1).

Воды этого подтипа околонейтральные и слабощелочные (pH 7,25–8,30), по величине минерализации пресные и солоноватые (0,71–1,82 г/л), их химический состав сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный и сульфатный магниево-кальциевый. Им свойственно насыщение кальцитом и глинами (каолинит, монтмориллонит, иллит).

Наиболее показательными признаками выделенных геохимических типов техногенных вод свинцово-цинковых месторождений являются изменения концентраций макрокомпонентов и минерализации при переходе от одного типа к другому. При этом в наибольшей степени (на порядок) возрастают концентрации ионов  $SO_4^{2^-}$ ,  $Ca^{2^+}$  и  $Na^+$ , что является закономерным результатом эволюции состава вод с ростом общей минерализации и обусловлено особенностями взаимодействия в системе «вода-кек», протекающего в условиях сочетания в минеральном составе хвостов сульфидной кислотопродуцирующей и карбонатной кислотонейтрализующей минерализации.

Кислотонейтрализующее воздействие карбонатной минерализации полиметаллических рудников обуславливает нейтральность, невысокие концентрации тяжелых металлов и кажущуюся, в связи с этим, «безопасность» их водных дренажей. Но, как известно, нейтральные и щелочные среды благоприятны для миграции таких высокотоксичных элементов, как мышьяк и сурьма, подверженных процессам метилирования с образованием значительно более токсичных форм, чем катионные [2, 10, 11, 25]. Изучение рудничных и подотвальных стоков Южного Урала [26] показало практически повсеместное присутствие в них Cd, Hg, As и Sb, имеющих минимальные ПДК в питьевых водах и представляющих, в связи с этим, значительную опасность при питьевом использовании, даже в случае их минимальных и, тем более, повышенных концентраций. К примеру, таких, которые фиксировались в нейтральных и слабощелочных водах, дренирующих отвалы обработанных Sb руд в Сардинии (Италия), где концентрации сурьмы достигали 30, а мышьяка – 16 мг/л [27].

Содержания мышьяка и сурьмы в рассматриваемых водах достигали аномально высоких значений (табл. 2), в десятки и сотни раз превышая средние показания для вод выщелачивания. Поскольку хвостохранилища расположены вблизи населенных пунктов (рис. 1) существует реальная угроза попадания токсичных компонентов в воды либо загрязнения атмосферного воздуха от пылевого переноса.

#### Заключение

Особенностью изученных объектов является формирование вод в условиях сочетания в минеральном составе хвостов сульфидной и карбонатной минерализации. Их химический состав формируется в результате совместного действия процессов гидролиза алюмосиликатов, растворения карбонатов и выщелачивания сульфидов руд, обогащающих растворы химическими элементами, и последующего их удаления в виде вторичных новообразований.

Анионный состав рассматриваемых вод – гидрокарбонатный, сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный и сульфатный, катионный – магниево-кальциевый и кальциевомагниевый. Воды пресные и солоноватые, по величине щелочно-кислотного показателя рН – околонейтральные и слабощелочные. В микроэлементном составе дренажных стоков преобладают мышьяк, цинк, кадмий, свинец, сурьма и марганец. Исследованные воды находятся в состоянии равновесия с глинистыми минералами и кальцитом, на основании чего установлена их принадлежность к двум геохимическим типам – кремнистокальциево-магниевому и кремнистому карбона-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Waste-rock hydrogeology and geochemistry / R.T. Amos, D.W. Blowes, B.L. Bailey, D.C. Sego, L. Smith, A.M. Ritchie // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 57. – P. 140–156. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.06.020.
- The Chemistry of Waters Associated with Metal Mining in Macedonia / D.M. Alderton, T. Serafimovski, B. Mullen, S. James // Mine Water and the Environment. - 2005. - V. 24. - № 3. -P. 139-149. DOI: 10.1007/s10230-005-0085-z.
- McCarthy T.S. The impact of acid mine drainage in South Africa // S. Afr. J. Sci. - 2011. - V. 107. - P. 5-6. DOI: dx.doi.org/10.4102/sajs.v107i5/6.712.
- Arsenic and antimony geochemistry of mine wastes and associated waters and sediments at the Giant Mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada / S.E. Fawcett, H.E. Jamieson, D.K. Nordstrom, R.B. McCleskey // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 62. – P. 3–17.
- Гавришин А.И. Закономерности формирования химического состава шахтных вод и их влияние на геоэкологическую ситуацию (ш. Комиссаровская, Восточный Донбасс) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 6. – С. 505–513.
- Оценка техногенной нагрузки на бассейны рек горнодобывающего района в южной части Кузбасса / Е.Л. Счастливцев, А.А. Быков, Н.И. Юкина, С.Г. Пушкин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 4. – С. 333–339.
- Замана Л.В. Геохимия кислых дренажных вод золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Вода: химия и экология. – 2013. – № 8. – С. 92–97.
- The impact of an abandoned mercury mine on the environment in the Xiushan region, Chongqing, southwestern China / X. Xu, Y. Lin, B. Meng, X. Feng, Z. Xu, Y. Jiang, W. Zhong, Y. Hu, G. Qiu // Appl. Geochem. - 2018. - V. 88. - Part B. -P. 267-275. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.04.005.
- СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почв и грунтов. URL: http://files.stroyinf.ru/Data1/11/11782/ (дата обращения 30.05.2018).
- Дорошкевич С.Г., Бардамова И.В. Фитотоксичность лежалых отходов обогащения сульфидно-вольфрамовых руд Джидинского месторождения (Западное Забайкалье) // Геоэкология, Инженерная геология, Гидрогеология, Геокриология. – 2016. – № 3. – С. 241–251.
- Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings / M.B.J. Lindsay, M.C. Moncur, J.G. Bain, J.L. Jambor, C.J. Ptacek, D.W Blowes // Applied Geochemistry. - 2015. - V. 57. -P. 157-177. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.01.009.
- Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update // Applied Geochemistry. - 2015. - V. 57. - P. 3-16. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.02.008.
- Mine waste acidic potential and distribution of antimony and arsenic in waters of the Xikuangshan mine, China / J. Zhou,

# тно-кальциевому, ведущая роль в смене которых принадлежит интенсивности водообмена.

Работа выполнена в рамках проекта IX.137.1.2. «Геохимия редких и редкоземельных элементов в природных и геотехногенных ландшафтах и гидрогеохимических системах».

M.T. Nyirenda, L. Xie, L. Baolong, Z. Yue, H. Liu // Applied Geochemistry. - 2017. - V. 77. - P. 52-61.

- Добровольская М.Г., Гордеев В.И. Свинцово-цинковые месторождения // Месторождения Забайкалья / под ред. акад. Н.П. Лаверова. В 2 кн. – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. І. – Кн. І. – С. 70–92.
- Геология и закономерности размещения эндогенных месторождений Забайкалья / Д.И. Горжевский, Н.А. Фогельман, Е.А. Алекторова и др. – М.: Недра, 1970. – 232 с.
- 16. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 т. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
- Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. – 368 с.
- Замана Л.В., Чечель Л.П. Гидрогеохимические особенности зоны техногенеза полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1-1. – С. 33–38.
- Чечель Л.П. Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 52–63.
- The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale / F.J. Millero, R. Feistel, D.G. Wright, T.J. McDougall // Deep-Sea Research. - 2008. -V. I. - № 55. - P. 50-72.
- 21. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Леушина С.К. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах междуречья Юньяхи и Ензорьяхи (Восточный склон Полярного Урала) // Вода: химия и экология. – 2012. – № 12 (54). – С. 121–129.
- 22. Еремин О.В., Абрамов Б.Н. Распределение лантаноидов и иттрия в породах и карьерных водах Шерловогорского оловополиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Вода: химия и экология. 2016. № 1. С. 18–23.
- Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза: 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты // под ред. академика Н.П. Лаверова. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
- Campbell K., Nordstrom D.K. Arsenic Speciation and Sorption in Natural Environments // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. - 2014. - V. 79. - № 1. - P. 185-216. DOI: https://doi.org/10.2138/rmg.2014.79.3
- Abdrakhmanov R.F., Akhmetov R.M. Hydrogeochemistry at mining districts // Geochemistry international. 2016. V. 54. № 9. – P. 795–806. DOI: 10.1134/S0016702916080024
- Fate of Antimony and Arsenic in Contaminated Waters at the Abandoned Su Suergiu Mine (Sardinia, Italy) / R. Cidu, E. Dore, R. Biddau, D.K. Nordstrom // Mine Water and the Environment. 2018. V. 37. № 1. P. 151–165. DOI: 10.1007/s10230–017–0479–8.

Поступила 05.06.2018 г.

#### Информация об авторах

*Чечель Л.П.*, научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук.

Замана Л.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук. UDC 550.424.4

## GEOCHEMICAL TYPES OF WATERS OF LEAD-ZINC DEPOSITS TAILINGS IN THE EASTERN TRANSBAIKALIA

Larissa P. Chechel<sup>1</sup>,

lpchechel@mail.ru

## Leonid V. Zamana<sup>1</sup>,

l.v.zamana@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 16<sup>a</sup>, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

**The relevance** of the topic is caused by the need to solve the problem of conserving the quality of water resources in the conditions of mining impact.

**The main aim** of the research is to study chemical composition of technogenic-transformed waters in the areas of development of three lead-zinc deposits of Transbaikalia and their geochemical typification.

**Objects** of the research are the waters of tailings of lead-zinc deposits Blagodatskoe, Akatuevskoe and Kadainskoe, located in the Eastern Transbaikalia.

**Methods.** Concentrations of anions were measured by turbidimetric, potentiometric, colorimetric methods; cations and metals were determined by the atomic-adsorption method and inductively-coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). To determine the equilibrium composition of secondary mineral phases the authors have used the diagrams of the stability fields of aluminosilicate minerals, plotted by the method proposed by R.M.Garrels and C.L.Christ.

**The results.** According to the ratio of the main ions, the considered waters belong to hydro-carbonate, sulfate-hydro-carbonate, hydro-carbonate-sulfate and sulfate magnesium-calcium and calcium-magnesium chemical types. Drainage waters of lead-zinc deposits are characterized by significant excess of heavy metal contents (As, Zn, Cd, Pb, Sb, Mn, Mo, U, La, Se) over the average composition of leaching zone waters, with a maximum for arsenic more than 800 times and zinc – 200 times. The character of location of water composition points on the stability diagrams of the aluminosilicate minerals indicates their saturation with respect to clay aluminosilicates and calcite, that allows referring them to two geochemical types: silica-calcium-magnesium and siliceous carbonate-calcium, taking into account the peculiarities of their chemical composition. The change of these two types is caused by the intensity of water exchange. Typification of anomalous hydrogeochemical fields in mining regions is aimed at improving the ecological and geochemical monitoring of natural waters and can be used in developing measures to prevent pollution and purify waters.

#### Key words:

Lead-zinc deposits, technogenic waters, tailings, mineral equilibrium, geochemical type.

The research was carried out within the project IX.137.1. 2. «Geochemistry of rare and rare earth elements in natural and geotechnogenic landscapes and hydrogeochemical systems».

#### REFERENCES

- Amos R.T., Blowes D.W., Bailey B.L., Sego D.C., Smith L., Ritchie A.M. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 140–156.
- Alderton D.M., Serafimovski T., Mullen B., James S. The Chemistry of Waters Associated with Metal Mining in Macedonia. *Mine Water and the Environment*, 2005, vol. 24, no. 3, pp. 139–149.
- 3. McCarthy T.S. The impact of acid mine drainage in South Africa. South African Journal of Science, 2011, vol. 107, pp. 5–6.
- Fawcett S.E., Jamieson H.E., Nordstrom D.K., McCleskey R.B. Arsenic and antimony geochemistry of mine wastes and associated waters and sediments at the Giant Mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 62, pp. 3–17.
- Gavrishin A.I. Regularities in the formation of chemical composition of mine water and its influents on geological situation (Komissarovskaya mine, Earsten Donbass). *Geoecology. Engineering* geology. Hydrogeology. Geocryology, 2015, no. 6, pp. 505-513. In Rus.
- Schastlivtcev E.L., Bykov A.A., Yukina N.I., Pushkin S.G. Assessment of anthropogenic impact on river basins in Kuzbass Mining Arias. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2015, no. 4, pp. 333–339. In Rus.
- Zamana L.V. Geochemistry of acidic drainage water of gold ore field of the East Trans-Baikal. *Water: chemistry and ecology*, 2013, no. 8, pp. 92–97. In Rus.

- Xu X., Lin Y., Meng B., Feng X., Xu Z., Jiang Y., Zhong W., Hu Y., Qiu G. The impact of an abandoned mercury mine on the environment in the Xiushan region, Chongqing, southwestern China, *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 88, part B, pp. 267-275.
- SanPiN 2.1.7.1287-03. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k kachestvu pochv i gruntov [Sanitary rules and norms 2.1.7.1287-03. Sanitary and epidemiological requirements to the quality of soil and grounds] Available at: http://files.stroyinf.ru/Data1/11/11782/ (accessed 30 May 2018).
- Doroshkevich S.G., Bardamova I.V. Phitotoxicity of tungstensulfide ore benefication tailings at Dzhidinskii ore deposit (the Western Cisbaikal region). *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2016, no. 3, pp. 241–251. In Rus.
- Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 157–177.
- Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 57, pp. 3–16.
- Zhou J., Nyirenda M.T., Xie L., Baolong L., Yue Z., Liu H. Mine waste acidic potential and distribution of antimony and arsenic in waters of the Xikuangshan mine, China. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 77, pp. 52–61.
- Dobrovolskaya M.G., Gordeev V.I. Svintsovo-tsinkovye mestorozhdeniya [Lead-zinc deposits]. Mestorozhdeniya Zabaykalya

[Deposits of Transbaikalia]. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, Geoinformmark Publ., 1995. Vol. I, B. I, pp. 70–92.

- Gorzhevskiy D.I., Fogelman N.A., Alektorova E.A. Geologiya i zakonomernosti razmeshcheniya endogennykh mestorozhdeniy Zabaykalya [Geology and regularities of placement of endogenous deposits of Transbaikalia]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 232 p.
- 16. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 2: Sistema voda-poroda v usloviyakh zony gipergeneza [Geological evolution and self-organization of the water-rock system. Vol. 2: Water-rock system in the hypergenesis zone]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 389 p.
- Garrels R.M., Krajst Ch.L. Rastvory, mineraly, ravnovesiya [Solutions, minerals, equilibria]. Moscow, Mir Publ., 1968. 368 p.
- Zamana L.V., Chechel L.P. Hydrogeochemical features of the zone technogenesis polymetallic deposits Southeastern Transbaikalia. Advances in modern natural science, 2015, no. 1–1, pp. 33–38. In Rus.
- Chechel L.P. Ecological and hydrochemical consequences of mining tungsten and molybdenum deposits of the eastern Transbaikalia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 52–63. In Rus.
- Millero F.J., Feistel R., Wright D.G., McDougall T.J. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Research*, 2008, vol. I, no. 55, pp. 50-72.

- 21. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Leushina S.K. Dispersal of rare earth elements in natural water of interstream area of the rivers Yun'yakha and Enzor'yakha (East hang of the Polar Urals). Water: chemistry and ecology, 2012, no. 12 (54), pp. 121–129. In Rus.
- 22. Eremin O.V., Abramov B.N. The distribution of lanthanides and yttrium in the rocks and quarry waters of Sherlovogorskoe tin-polymetallic deposit (Eastern Transbaikalia). *Water: chemistry and ecology*, 2016, no. 1, pp. 18–23. In Rus.
- Shvartsev S.L. Gidrogeokhimiya zony gipergeneza [Hydrogeochemistry of hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p.
- Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty [Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and ecological aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Campbell K., Nordstrom D.K. Arsenic Speciation and Sorption in Natural Environments. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2014, v. 79, no. 1, pp. 185-216.
- Abdrakhmanov R.F., Akhmetov R.M. Hydrogeochemistry at mining districts. *Geochemistry international*, 2016, vol. 54, no. 9, pp. 795-806.
- Cidu R., Dore E., Biddau R., Nordstrom D.K. Fate of Antimony and Arsenic in Contaminated Waters at the Abandoned Su Suergiu Mine (Sardinia, Italy). *Mine Water and the Environment*, 2018, v. 37, no. 1, pp. 151–165.

Received: 5 June 2018.

#### Information about the authors

*Larissa P. Chechel*, researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences.

*Leonid V. Zamana*, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 550.837+551.247.1+551.435.164

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН РАЗВИТИЯ СУФФОЗИОННО-ПРОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Шалагинов Александр Евгеньевич<sup>1,2</sup>,

shalaginovae@ipgg.sbras.ru

Неведрова Нина Николаевна<sup>1,3</sup>,

nevedrovann@ipgg.sbras.ru

Шапаренко Илья Олегович<sup>1</sup>.

shaparenkoio@ipgg.sbras.ru

## Бабушкин Сергей Михайлович<sup>4</sup>,

bab@gs.sbras.ru

- <sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.
- <sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
- <sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.
- <sup>4</sup> Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

**Актуальность** работы обусловлена недостаточностью знаний о причинах развития суффозионных процессов, выраженных в виде провалов земной поверхности, угрожающих инфраструктуре промышленного производства в Прикаспийской впадине. **Цель:** определение приповерхностного и глубинного геоэлектрического строения участка проявления суффозионно-просадочных образований для выяснения возможных причин их возникновения.

**Объектом** исследования являются суффозионно-просадочные образования в виде воронкообразных провалов земной поверхности глубиной от 1 до 6 м в количестве 15 штук, расположенных в трёх практически параллельных зонах.

**Методы.** Весь объем полевых данных получен тремя разноглубинными методами геоэлектрики: электротомография, вертикальное электрическое зондирование, нестационарное электромагнитное зондирование. Обработка, интерпретация, визуализация данных осуществлялась с помощью интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии ЭРА, EMS, Zond, Res2D, ERTLab. Обоснование результатов проведено на основе анализа и сопоставления полученных данных геоэлектрики с априорными геологическими данными.

**Результаты.** По результатам выполненных работ с максимальной глубинностью до 400—500 м построены разрезы и карты распределения удельного электрического сопротивления на разных глубинах, трехмерные геоэлектрические модели, как для приповерхностной, так и глубинной части участка. В результате геологической интерпретации данных выделены зоны (по параметру УЭС), к которым приурочены существующие воронки, определено направление выноса разрушенных (размытых) горных пород. Выявлены структуры, связанные с зонами развития суффозионно-просадочных процессов, и сформулированы возможные причины их формирования.

**Выводы.** Показана высокая эффективность комплекса электромагнитных методов, использованных на участке с деструктивными явлениями. Сделан вывод, что основной механизм образования воронок связан с вымыванием известнякового и солевого «цемента» из неоген-четвертичных отложений, с дальнейшей разгрузной в более глубокие обводненные горизонты. Этот комплекс может быть рекомендован при решении аналогичных задач в других регионах, где имеются зоны проявления суффозионных процессов, а также для мониторинга их развития.

#### Ключевые слова:

Геоэлектрическое строение, вертикальное электрическое зондирование, электротомография, нестационарное электромагнитное зондирование, суффозионные процессы.

#### Введение

Как известно, суффозия – это сложный процесс выщелачивания растворимых компонент горных пород, механического выноса мелких частиц и подземной эрозии с нарушением структуры грунтов, формированием ослабленных и разуплотненных зон и полостей и возможным образованием на земной поверхности деформаций (блюдец, воронок, впадин). Возникновение и развитие суффозионных образований относят к одному из видов опасных геологических процессов. Здания, инженерные сооружения, коммуникации, попадающие в зону их влияния, могут испытывать значительные деформации вплоть до аварийных ситуаций и разрушений с негативными промышленными и экологическими последствиями [1, 2].

Развитие суффозионного процесса в физических параметрах – это аномальное разуплотнение и аномальное изменение электропроводности в различных по масштабу объемах горных пород. Соответственно последствия этих процессов должны проявляться в электрическом и электромагнитном поле, что позволяет обосновать использование электроразведки для картирования потенциальных деструктивных образований.

Учитывая, что развитие суффозии приводит к изменению во времени электропроводности отложений, появляется возможность оценивать последовательные стадии развития таких процессов вплоть до возможного образования деформаций в приповерхностных отложениях путем проведения повторных электроразведочных работ.

В пределах горного отвода одного из месторождений Прикаспийской впадины были обнаружены проявления опасных суффозионных процессов в виде воронкообразных провалов земной поверхности глубиной от 1 до 6 м (рис. 1, А) [3]. Всего таких образований выявлено 15. На участке исследования они расположены в трёх практически параллельных зонах, ориентированных с запада на восток (рис. 1, Б).

Так как развитие суффозионных образований может угрожать промышленной инфраструктуре месторождения, необходимо выявить возможные причины их образования на основе изучения особенностей строения участка геофизическими методами.

В ходе выполнения работ в 2017 г. с целью определения геоэлектрических параметров горного массива, подверженного суффозии, были привлечены разноглубинные методы постоянного и переменного тока: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электротомография (ЭТ), электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС). Для детального расчленения самой верхней части разреза используется метод ЭТ, который в настоящее время наиболее востребован для широкого спектра малоглубинных задач. Метод совмещает принципы электрического зондирования и профилирования и обладает высокой разрешающей способностью [4]. Метод ВЭЗ применяется для определения строения разреза до глубин в первые сотни метров, хорошо согласуется с данными ЭТ для приповерхностных отложений и с данными ЗС на глубинах от 50 до 100 м [5]. Метод ЗС привлечен для исследования глубинной части разреза. Для всех методов имеются современные аппаратурно-методические и программно-алгоритмические средства моделирования, инверсии, двухтрехмерной визуализации [6-8].

# Краткая геологическая характеристика участка исследования

В геолого-структурном отношении участок исследования расположен во внутренней части северной бортовой зоны Прикаспийской впадины. В разрезе осадочного чехла можно выделить три структурных комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой, которые слагают отложения палеозоя (пермская система), мезозоя (триасовая, юрская и меловая системы) и кайнозоя (неогеновая и четвертичная системы).

Горные породы пермской системы представлены в основном гипсами, ангидритами с тонкими субгоризонтальными прослоями мелкокристаллических доломитов; толщей каменной соли с прослоями доломитов, ангидритов и гипса. В верхней части залегают отложения, сложенные пачкой мергелистых и песчанистых глин.

Литологический состав триасовых отложений представлен песками, полимиктовыми песчаниками, конгломератами и глинами. Разнозернистые песчаники содержат глину, гальку кварца, кремней. Карбонатные глины с содержанием пирита имеют разнообразную пеструю окраску (краснобурые, голубовато-серые).

Отложения юрской системы в районе участка исследования сложены песчано-глинистыми породами. Преобладают пески светло-серые, серые, коричневато-серые, мелкозернистые, кварцевые, глинистые, содержащие рассеянную и в виде линз гальку кварца и кремня. Выше по разрезу пески сменяются песчано-глинистой толщей, характеризующейся переслаиванием серых и темно-серых песчанистых глин с песком и алевритом.

В меловой системе наблюдаются песчанистые глины, обладающие неясной слоистостью, а также выделяются черные жирные глины, участками сажистые. В глинах встречаются многочисленные друзы гипса, конкреции пирита и гнезда зеленовато-серого глауконитового песка. Выше по разрезу выделены слабо песчанистые, слюдистые, жирные глины. Окраска глин серая, темно-серая с зеленоватым оттенком. В глинах встречаются тонкие прослои крепких песчаников зеленовато серого цвета.

Неогеновые отложения с резким стратиграфическим несогласием залегают на различных горизонтах нижнего мела и триаса. Нижняя часть разреза представлена зеленовато-серыми, темно-серыми глинами с прослоями зеленовато-серых глауконитовых песков, песчаников с галькой и гравием меловых пород. В верхней части залегают коричневые и красновато-бурые глины, суглинки, желтовато-серые пески.

Отложения четвертичной системы образовались в континентальных условиях и представлены желто-бурыми, коричнево-бурыми, реже мелоподобными грубыми неслоистыми суглинками с редкой плохо окатанной галькой меловых отложений и хорошо окатанной мелкой галькой уральских пород.

Морфологически участок исследования представлен делювиальным склоном и речными террасами. Суффозионные воронки расположены на границе третьей надпойменной террасы и делювиального склона в тыловой закраине.

В тектоническом плане для участка работ, как и для всей прибортовой зоны Прикаспийской впадины, характерно наличие над комплексом пород



**Puc. 1.** A) карта Прикаспийской нефтегазоносной провинции; Б) схема расположения суффозионных воронок на участке исследования **Fig. 1.** A) map of the Caspian oil and gas province; Б) schematic map showing the location of the suffosion funnels

фундамента трех структурных этажей, которые неадекватно реагировали на тектоническую активизацию региона и образовали специфические, присущие только им, дислокации.

Нижний структурно-литологический комплекс палеозоя, охватывающий породы до артинского века включительно, характеризуется тектоно-седиментационными структурами рифовых массивов.

В среднем структурно-литологическом комплексе, сложенном пластичной солевой толщей кунгура, образовались резко дисгармоничные структуры по отношению как к подстилающему, так и к перекрывающему этажам. Эти структуры получили в геологической литературе название «соляные», а области их распространения – области проявления «соляной тектоники».

Верхний структурно-литологический комплекс характеризуется своеобразием структурных форм, образованных в красноцветной толще верхней перми и триаса, основным морфологическим типом которых являются синклинальные складки.

Проявившаяся уже после формирования континентальных красноцветных образований верхней перми и терригенных толщ триаса соляная тектоника полностью видоизменила подсолевой структурный план. Однако развитие солянокупольных структур было во многом предопределено структурными особенностями элементов фундамента, поскольку соляные купола и валы большей частью повторяют ориентировку бортового подсолевого уступа.

Таким образом, поскольку участок находится в области развития соляно-купольной тектоники, можно предположить, что деструктивные явления могут быть связаны с выщелачиванием растворимых солей, поступающих в почву с паводковыми водами, в верхних слоях суглинков, супесей и глин [2].

## Методика измерений комплекса методов геоэлектрики

Исследования проводились с использованием современных технических средств и методик наземной электроразведки.

Электромагнитные зондирования (ЗС) выполнены цифровой телеметрической аппаратурой серии «БАЙКАЛ МЭРС», по методике пространственно-временной регистрации сигнала становления поля с индуктивной установкой Q, q («соосные петли») [9]. В качестве генераторной конструкции (Q) использовались незаземленные петли квадратной формы со стороной равной 100 и 200 м. Измерения осуществлялись незаземленной квадратной петлей (q) со стороной 50 и 100 м. На индуктивную составляющую поля практически не влияют высокоомные экраны и приповерхностные неоднородности, имеется повышенная устойчивость к промышленным и магнитотеллурическим помехам [10]. Ток в генераторной петле был выбран при проведение опытных работ на уровне 3,0-3,5 А для измерения начальной стадии переходного процесса и 20,0–25,0 А для его поздней стадии. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала составила 0,2–0,5 мкВ, что позволило достигнуть глубинности исследования до 450–500 м.

Измерения методом ВЭЗ выполнены симметричной градиентной четырехэлектродной установкой Шлюмберже с максимальным разносом AB/2 – 480 м, с использованием аппаратуры SGD «MEDUSA». При проведении опытных работ было выявлено, что кривая ВЭЗ уверенно выходит на опорный геоэлектрической горизонт на глубинах ~100 м, начиная с разносов AB/2 120–150 м.

При планировании полевых работ было предложено проводить измерения методами ВЭЗ и ЗС в одних и тех же пунктах в два этапа [11]. На первом этапе пройдены два ортогональных профиля (рис. 2, А) длиной в 1200 м, пересекающие участок исследования, для определения направления выноса разрушенных (размытых) горных пород; а на втором этапе измерения выполнены по площади (рис. 2, Б) размером 360×460 м непосредственно в зоне обнаруженных воронок для выявления закономерностей развития суффозионно-просадочных процессов.

Самый большой объем полевых работ выполнен методом электротомографии (ЭТ), (многоэлектродные зондирования высокой плотности на постоянном токе) с использованием электроразведочной станции «Скала-48» для получения геоэлектрических параметров верхней части разреза [12].

Методом ЭТ проведены детальные измерения на площади проявления воронок по параллельным профилям, широтного и меридионального простирания (рис. 3). Шаг между профилями составлял 10 м. Для создания профиля необходимой длины применялась нагоняющая расстановка (roll along). 48 электродов объединены в косу общей длиной в 240 м, разделенную на два сегментами по 24 электрода с шагом 5 м между ними. После начального измерения на двух сегментах происходит перенос первого сегмента для продолжения непрерывного профиля и так несколько раз до достижения нужной длины [13, 14].

Таким образом, в результате полевых работ методами ВЭЗ и ЗС выполнены измерения в 38 пунктах. Методом электротомографии получены данные по 48 меридиональным профилям длиной 355 м и по 11 профилям широтного простирания длиной 475 м.

#### Обработка и интерпретация полевых данных

Интерпретация данных ЗС. Обработка и интерпретация полевых данных ЗС осуществлялась в два этапа. Вначале была выполнена предварительная обработка с помощью специализированных программных средств, результатом которой являются сами измеренные сигналы (ЭДС), очищенные от помех, и их трансформанты – кривые кажущегося удельного электрического сопротивления ( $\rho_{\tau}$ ), электропроводности.



РК11 - Пункт физических наблюдений ЗС и ВЭЗ



- Граница исследуемого участка

- **Рис. 2.** Размещение пунктов регистрации вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением поля (3C): А) по ортогональным профилям; Б) на участке детальных работ
- Fig. 2. Placement of registration points of vertical electric sounding (VES) and transient electromagnetic sounding (TEM): A) on orthogonal profiles; B) on the site of detailed works



Рис. 3. Размещение профилей электротомографии на участке исследования

 $Fig. \ 3. \ \ Placement \ of \ electrotomography \ profiles \ on \ the \ studied \ area$ 

Количественная интерпретация проведена на следующем этапе с использованием интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии: Эра, EMS, разработанных в ИНГГ СО РАН [15], и ZondTEM1D на основе горизонтальнослоистой модели [16]. Каждый комплекс содержит несколько функциональных пакетов, с помощью которых можно провести численное моделирование, оценить результаты интерпретации. Для полученных геоэлектрических параметров вычисляются погрешности их определения и степень влияния на электромагнитное поле, области локальной эквивалентности, кроме того, выполняется оценка глубинности зондирования [17].

Вначале выполнена интерпретация полевых данных, полученных при измерениях по ортогональным профилям с большими размерами генераторно-приемной установки (ГП размером  $200 \times 200$  м, ИП –  $100 \times 100$  м). Глубинный геоэлектрический разрез по широтному профилю ПР 1 получен на основе профильной интерпретации данных ЗС пикетов ПК 1-ПК 7 с помощью программного комплекса ZondTEM1D, в котором реализован подход, учитывающий данные в соседних точках зондирования (рис. 4). На геоэлектрическом разрезе приведен рельеф дневной поверхности по линии профиля ПР 1 с соотношением масштабов по вертикали и латерали 1:30, а также показано размещение суффозионных воронок, приуроченных к траектории профиля.

В ходе интерпретации данных ЗС обоснована шестислойная модель среды с усложнением её до семислойной в пикетах ПК 1 и ПК 2. Появление низкоомного интервала вначале профиля на глубинах 400–500 м обусловлено наличием проводящего горизонта в кровле соленосного купола.

На геоэлектрическом разрезе четко выражена тенденция погружения кровли горизонта с повышенным значением УЭС до 20–50 Ом·м (краснокоричневый цвет), представленного по геологическим данным уплотненными породами глинистой фракции триасового возраста в интервале глубин кровли от 80 м в западной части профиля до 300 м в его восточной части.

Согласно залегающие на нем более низкоомные горизонты с уровнем УЭС в 3,2–6,0 Ом м отнесены к породам меловой и юрской систем. Данные геоэлектрические горизонты сложены породами глинистых и известняковых фракций с высоким уровнем минерализации, их мощность возрастает с первых метров в районе пикета ПК 2 до 250 м и более в ПК 7.

Приповерхностные горизонты с УЭС в интервалах 6,1–12,0 Ом⋅м относятся к неоген-четвертичным (N, Q) отложениям. Мощность этих отложений в районе ПР 1 изменяется от значений ~80 м в ПК 1 западной части профиля до 20–25 м в его вос-



Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю ПР 1 по данным зондирования становлением поля (3C)

Fig. 4. Geoelectric section on the PR 1 profile according transient electromagnetic sounding (TEM) data



**Рис. 5.** Геоэлектрический разрез по профилю ПР 4 по данным зондирования становлением поля (3С)

 ${\it Fig. 5.} \quad {\it Geoelectric\ section\ on\ the\ PR\ 4\ profile\ according\ transient\ electromagnetic\ sounding\ (TEM)\ data$ 

точной части (ПК 7). Воронки 5–8 находятся на профиле между ПК 4 и ПК 5. Значения УЭС четвертичных отложений на данном участке профиля достигает 12 Ом·м, что является аномальным для верхней части разреза.

Разрезы по ортогональным профилям ЗС (ПР 1, ПР 2) показали, что на участке детальных работ (рис. 2, Б) с развитыми суффозионно-просадочными проявлениями в виде воронок глубина до кровли пород с повышенными значениями УЭС в 20-50 Ом·м, представленных плотными глинами триаса, составляет от 130 до 180-200 м.

Для более детального расчленения верхней части разреза в зоне развития воронок по результатам опытно-методических работ была выбрана более локальная установка ЗС с меньшими размерами генераторно-приемных петель (ГП – 100×100 м, ИП – 50×50 м). Размеры установок позволили при достаточной глубинности исследования (до опорного горизонта) повысить детальность представления верхней части разреза. На геоэлектрическом разрезе по профилю 4 (ПК 33–ПК 27) линии расположения воронок совпадают с направлением погружения кровли опорного геоэлектрического горизонта, соотнесенного с глинами триаса (рис. 5). Также в этом направлении отмечается возрастание мощности низкоомных горизонтов юрской и меловой систем.

Неоген-четвертичные отложения верхней части разреза залегают с заметным несогласием на подстилающих горизонтах. При этом четко прослеживается тенденция приуроченности основной группы воронок, кроме воронок 1 и 9, к участкам с повышением УЭС от 7–9 до 14–30 Ом.м. В целом по результатам интерпретации данных ЗС получено геоэлектрическое строение до глубин в 500 м, выявлено положение кровли и значения УЭС соленосного купола, определена мощность триасовых водоупорных глин (~300 м) и их погружение на восток. По более детальным измерениям охарактеризованы подповерхностные отложения в зоне воронок.

Интерпретация данных ВЭЗ. Обработка и интерпретация полевых данных ВЭЗ также осуществлялась в два этапа. На первом этапе, непосредственно в ходе измерений, по значениям тока в источнике, разности потенциалов между приёмными электродами MN, размерам использованной установки вычислялось кажущееся удельное сопротивление ( $\rho_h$ ) для оценки качества полевых данных. На втором этапе количественной интерпретации выполнялась одномерная и двумерная инверсия, а также визуализация результатов с помощью программного комплекса «Zond» [16].

Поскольку в основу программы ZondIP1D положена концепция профильной интерпретации, данные ВЭЗ по профилю рассматриваются как отражение геологического разреза в целом, а не как набор независимых кривых зондирования, с которыми работают по отдельности. Геоэлектрический разрез по широтному профилю ПР1 построен на основе совместной интерпретации данных ВЭЗ 1–7 (рис. 6).

Глубина до кровли опорного горизонта в 75 м по данным ВЭЗ определена только в пункте 1. В последующих пунктах кровлю горизонта проследить по данным ВЭЗ не представляется возможным, поэтому она показана условно по данным интерпретации ЗС. Значения УЭС опорного горизонта достигают ~50 Ом·м.

Характеристики залегающих выше низкоомных отложений со значениями удельного электрического сопротивления 4–7 Ом·м согласуются с данными ЗС и отнесены по геологической привязке к породам меловой и юрской систем. Их мощность установлена только в районе ПК 1 в 80 м. Приповерхностные горизонты неоген-четвертичных отложений неоднородны по значению удельного электрического сопротивления, которое изменяется по латерали от 5–8 до 15–20 Ом·м. Их мощность минимальна в пункте 1, где составляет 4 м, и достигает 40 м в центре профиля. В районе пунктов ПК 2–4 до глубин примерно в 20 м в этих отложениях выделяется протяженный низкоомный горизонт со значениями УЭС 3–5 Ом·м. К более высокоомным неоген-четвертичным отложениям с УЭС в 18–20 Ом·м, развитым до глубин в 50–60 м в районе ПК 4, 5, приурочена зона образования воронок 5–8.

Тонкий верхний почвенный горизонт небольшой мощности – от 0,5 до 1 м, и характеризуется высокими значениями УЭС (45–150 Ом·м). Его геоэлектрические характеристики сильно изменяются по профилю без какой-либо общей тенденции, по-видимому, они определяются локальными геоморфологическими особенностями.

На участке с суффозионными проявлениями выполнена серия измерений ВЭЗ по профилям, совмещенным с измерениями ЗС. Рассмотрим геоэлектрический разрез, построенный по субширотному профилю ПР 4, проходящему по линии размещения воронок 1–4, 15 (рис. 7).

На геоэлектрическом разрезе по профилю ПР 4 видно, что воронки 2–4 и 15 в приповерхностной части разреза подстилаются неоген-четвертичным отложениям с повышенными значениями УЭС до 15 Ом.м. В районе ПК 34–35 в неоген-четвертичных отложениях, на глубине ~20 м, наблюдается протяженная низкоомная зона со значениями УЭС 4–10 Ом.м, что согласуется с результатами ЗС по этому же профилю. Ниже по разрезу выделяются отложения юрской и меловой систем с УЭС в интервале 3–7 Ом.м. Пунктирными стрелками показана траектория разгрузки сбросовых вод.

Применение метода ВЭЗ при исследовании обусловлено возможностью более детального расчленение верхней части разреза до глубин в первые де-



Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю ПР1 по данным вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)

Fig. 6. Geoelectric section on the profile PR1 according to the vertical electric sounding (VES) data



Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю ПР 4 по данным вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)

Fig. 7. Geoelectric section on the profile PR4 according to the vertical electric sounding (VES) data

сятки метров для сопоставления и согласования с данными электротомографии. А в интервале глубин примерно от 50 до 100 м данные ВЭЗ и ЗС хорошо согласуются, что повышает общую достоверность результатов. В целом по данным ВЭЗ уточнено строение приповерхностных отложений неогенчетвертичного возраста, выделены зоны наиболее низкого УЭС, вероятнее всего, обводненные.

Таким образом, по комплексу данных ВЭЗ и ЗС мощность отложений меловой и юрской систем изменяется от 40 м в западной части участка до 250–300 м в его восточной части, а УЭС – от 3 до 6 Ом м. Геоэлектрические параметры триасовых и солянокупольных отложений, особенности их залегания определены по данным метода ЗС.

Интерпретация данных электротомографии. Обоснованием применения метода является его высокая эффективность при работах с целью определения геоэлектрических параметров деструктивных проявлений, таких как разломные нарушения, карстовые образования [18, 19].

Предварительная обработка полевых данных ЭТ в зоне воронок выполнена с помощью программного обеспечения SiBER Tools, предназначенного для создания и редактирования файлов с параметрами установок, а также первичной обработки данных, которая заключается в фильтрации, компоновке и экспорте данных в программы интерпретации. Для интерпретации данных и визуализации результатов использован программный пакет RES2D (компания Geotomo softwear, Малайзия) [20], ERTlab [21].

По данным электротомографии определено детальное геоэлектрическое строение приповерхностных неоген-четвертичных отложений до глубины 40 м. Полученный интервал значений УЭС от 1 до 30 Ом·м для этих отложений в принципе согласуется с данными ВЭЗ, а построенные разрезы наглядно отражают геоэлектрическое строение в зонах расположения суффозионных воронок.

Профиль 30 ЭТ проходит через воронку 2, а профиль 43 через воронку 14. На геоэлектрических разрезах по обоим профилям на глубине в 5-6 м непосредственно под воронкой выделяются отложения с повышенным значением УЭС относительно вмещающих пород (8, А, Б), что можно объяснить разуплотнением грунта.

Кроме того, одной из особенностей распределения воронок по площади является приуроченность большинства воронок к контакту протяженных высокоомных зон с более проводящими зонами, общим простиранием с запада на восток. Эти зоны выделены на глубинах, начиная от 15–20 м.

На основе результатов интерпретации площадных данных ЭТ построена трехмерная модель геоэлектрической среды до глубины 40 м (рис. 9). Изоповерхность на уровне 25 Ом м оконтуривает выделенные высокомные зоны. Показано также размещение воронок (цветовая гамма отражает их объем).

## Обсуждение результатов на основе обобщенной геоэлектрической модели участка развития суффозионных процессов

В результате анализа, обобщения и согласования геоэлектрических моделей, полученных по данным каждого метода геоэлектрики, была построена модель, характеризующая строение участка исследования в целом. От дневной поверхности до глубины 40 м модель построена по данным электротомографии, до глубины 120 м – по данным ВЭЗ, строение самых глубинных горизонтов до 500 м отражают данные ЗС.



Рис. 8. Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии по профилю: А) 30; Б) 43

Fig. 8. Geoelectric section according to electrotomography data on the profile: A) 30; B) 43



Рис. 9. Изоповерхность удельного электрического сопротивления на уровне 25 Ом-м по данным электротомографии

Fig. 9. Electrical resistivity isosurface at the level of 25  $Om \cdot m$  according to electrotomography data

В приповерхностной части геоэлектрической модели по данным ЭТ выделено чередование протяженных высокоомных и низкоомных зон, представленных отложениями неоген-четвертичного возраста и выделенных на глубинах от 15 до 40 м. Высокоомные зоны с УЭС от 25 до 50 Ом м по геологическим данным могут быть соотнесены либо с более плотными малообводненными грунтами, либо с разуплотненными породами, из которых произошло вымывание глиняного и солевого «цемента». В свою очередь низкоомные зоны представлены более обводненными породами с УЭС ~5-10 Ом.м. Суффозионные воронки 1, 10-14 находятся непосредственно в низкоомной зоне, а воронки 5-9, 2-4, 15 – на контакте высокоомных и низкоомных аномалий.

Аномально высокоомные протяженные отложения фактически являются ограничивающим фактором в развитии суффозионных процессов. С большой долей вероятности можно считать, что вдоль них и происходило вымывание растворимых отложений в глубину. Это привело к депрессии подповерхностного горизонта до глубин порядка 15-30 м с последующей просадкой грунтов. Поскольку по геологическим данным участок исследования расположен на границе надпойменной террасы и делювиального склона, чередование высокоомных и низкоомных зон, скорее всего, связано с особенностями формирования отложений на этой границе. Неоген-четвертичные слои верхней части разреза залегают с заметным несогласием на подстилающих горизонтах.

Далее на глубине от 40 до 80 м в западной части участка и от 40 до 200 м в его восточной части по данным ВЭЗ и ЗС выделяются ещё более низкоомные горизонты с уровнем УЭС от 3 до 6 Ом·м, соотнесённые с породами меловой и юрской систем. Они сложены породами глинистых и известняковых фракций с высоким уровнем минерализации подземных вод. По этим обводненным горизонтам как раз и происходила разгрузка сбросовых вод.

Ниже по разрезу по данным ЗС и частично по данным ВЭЗ четко прослеживается тенденция погружения кровли горизонта с повышенным значением УЭС до 20–50 Ом⋅м, представленного по геологическим данным уплотненными породами глинистой фракции триасового возраста в интервале глубин до кровли от 80 м в западной части участка до 300 м в его восточной части. Мощность горизонта по разрезу постоянна и составляет ~300 м. В процессе вымывания растворимых частиц в вышележащих слоях этот высокоомный горизонт являлся водоупорным, вдоль него происходил сток подземных вод вниз по склону.

В западной части участка в районе двух пунктов ЗС ПК 1 и ПК 2, под высокоомными отложениями триаса, отмечено появление низкоомного интервала (УЭС ~6–7 Ом·м) на глубинах 400–500 м, обусловленного наличием проводящих горных пород в кровле соленосного купола. По данным ЗС в западной части, где кровля купола расположена ближе всего к дневной поверхности, удалось определить его геоэлектрические параметры. Согласно геологическим данным, погружение кровли соляного



Puc. 10. Трехмерная визуализация геоэлектрического строения участка Fig. 10. Three-dimensional visualization of the site geoelectric structure
купола происходит на восток, что полностью подтверждено результатами интерпретации данных метода ЗС.

Выполнена трехмерная визуализация геоэлектрического строения основных структур участка, связанных с процессом развития суффозионнопросадочных процессов (рис. 10).

Известно, что одной из причин возникновения суффозионных процессов является искусственное нарушение режима подземного потока. Например, открытый водоотлив из котлованов часто вызывает такое увеличение скорости движения потока подземных вод, что он приводит к выносу частиц из грунта [22]. На участке исследования нарушение гидрогеологического режима связано с постройкой гидротехнического сооружений. В 1950-1960 гг. прошлого столетия в русле одной из балок было создано водохранилище, расположенное южнее участка проявления суффозионных явлений. В приплотинной зоне его левого борта выполнено водоотводное сооружение для сброса излишков воды из водохранилища по сухому логу в понижение, к которому и приурочено большинство суффозионных провалов. Таким образом, возникший новый поверхностный водоток вместе с участками разливов сбросовых вод в его устье, вероятнее всего, стал фактором интенсивного увлажнения суглинистых просадочных грунтов естественного сложения, а его продолжительное воздействие вызвало активизацию суффозионно-просадочного процесса.

Исходя из геоэлектрического строения, воронки на участке исследования можно разделить на две группы, и у каждой из групп предполагается свой механизм образования. Первая группа, в которую входит большинство воронок с номерами 2-8, 10-15, расположена в зоне пониженных значений абсолютных высотных отметок, соответствующих руслу сброса вод из водохранилища. Основной механизм их образования связан с разгрузкой сбросовых вод в подстилающие низкоомные горизонты меловой и юрской систем. Вклад инфильтрации атмосферных осадков и талых вод несущественен. При периодических сбросах из водохранилища вода вымывала из приповерхностных неоген-четвертичных отложений глиняный и солевой «цемент», а выявленные зоны высокоомных пород в этих отложения задавали направление вымывания. Затем воды фильтровались в подстилающие низкоомные горизонты меловой и юрской систем, и далее по склону уходили на глубину. Поэтому образование этих воронок происходило быстрее всего. Сейчас деструктивные процессы за счет вымывания солей практически закончены. Подстилающие породы, контролирующие данные воронки, скорей всего, имеют устойчивые геоэлектрические параметры.

Несколько другой механизм образования второй группы воронок – 1 и 9. Они находятся вне основного русла сброса вод, и основной вклад в вымывание цементирующих компонент грунтов верхней части разреза происходит именно за счет инфильтрации талых вод и атмосферных осадков в подстилающие низкоомные горизонты меловой и юрской систем. По результатам анализа геоэлектрических параметров среды участков с этими двумя воронками, можно с достаточной долей уверенности предположить, что процесс их формирования еще не закончен и, скорее всего, он будет более длительным. Визуальный осмотр воронок подтверждает этот вывод. У воронки 9 наблюдаются крутые края, не полностью сформировавшийся поверхностный покров. Для воронки 1 таких внешних факторов не отмечено, что, возможно, объясняется более медленной скоростью деструкции.

### Выводы

На основе анализа полученных результатов выявлены главные причины образования и закономерности размещения суффозионных воронок на данном участке. Преобладание монтмориллонита в тонкодисперсной фракции в сочетании с засоленностью грунтов способствовало развитию процессов набухания и просадочных свойств. Ведущей техногенной причиной формирования провалов являлось образованное в русле одной из балок водохранилище, создавшее новый поверхностный водоток, интенсивно увлажнявший суглинистые просадочные грунты естественного сложения, а его продолжительное воздействие привело к активизации суффозионно-просадочного процесса. Разгрузка сбросовых вод происходила в подстилающие низкоомные (обводненные) горизонты меловой и юрской систем, а погружение водоупорных глинистых отложений триасового возраста с запада на восток определяло направление выноса растворенных частиц в более глубинные горизонты. Линейность размещения воронок, совпадающая с простиранием выявленных чередующихся протяженных низкоомных и высокоомных зон подповерхностных отложений, связана, по геологическим данным, с особенностями формирования неоген-четвертичных отложений на границе третьей надпойменной террасы, протекающей здесь реки и делювиального склона.

### Заключение

По результатам выполненного исследования определено приповерхностное и глубинное геоэлектрическое строение участка проявления суффозионно-просадочных процессов, выявлены закономерности расположения суффозионных воронок относительно подстилающих отложений, и предложена модель процесса их формирования. По данным геоэлектрики сделан вывод, что основной механизм образования воронок связан с вымыванием известнякового и солевого «цемента» из неоген-четвертичных отложений и дальнейшей разгрузкой сбросовых вод в подстилающие низкоомные горизонты меловой и юрской систем. Далее вдоль кровли триаса, вниз по склону, эти воды уходят в глубину массива горных пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникеев А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. – 2006. – № 6. – С. 544–553.
- Аникеев А.В., Леоненко М.В. Прогноз провалообразования при изменении гидродинамического режима на примере Дзержинского карстового района // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 2. – С. 130–146.
- Akhmedenov K.M., Iskaliev D.Zh., Petrishev V.P. Karst and Pseudokarst of the West Kazakhstan (Republic of Kazakhstan) // International Journal of Geosciences. - 2014. - № 5. -P. 131-136.
- Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44 (1). – P. 131–152.
- Паршаков Е.И. Исследования закарстованности участка методов ВЭЗ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. труд. Вып. № 14. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2016. – С. 234-235.
- Kamenetsky F.M. Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon // Extended Abstracts. 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. Weimar, Germany, August 24–30, 2014. P. 4.
- Displacement currents in geoelectromagnetic problems / V. Mogilatov, M. Goldman, M. Persova, Y. Soloveichik // Journal of Applied Geophysics. - 2014. - V. 105. - P. 133-137.
- Чубаров М.В., Власов А.А., Шалагинов А.Е. Построение трехмерных геоэлектрических моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне на основе результатов одномерной инверсии // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2017. XIII междунар. науч. конгр. Новосибирск, 17–21 апреля 2017. Т. 4. С. 129–134.
- Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н. Аппаратурные и методические средства при поисках рудных месторождений методом нестационарного электромагнитного зондирования // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2017. XIII междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 17–21 апреля 2017. – Т. 2. – С. 271–275.
- Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 794 p.
- О комплексировании методов ВЭЗ и ЗС в ближней зоне / П.В. Иванов, Д.А. Алексеев, А.П. Бобачев, П.Ю. Пушкарев,

А.Г. Яковлев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 42–51.

- Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям / Е.В. Балков, Д.И. Фадеев, Ю.Г. Карин, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 5. С. 783–791.
- Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review // Earth-Science reviews. - 2014. - № 135. - P. 65-82.
- Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France / C. Gelis, M. Noble, J. Cabrera, S. Penz, H. Chauris, E.M. Cushing // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – № 173. – P. 573–589.
- Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS / О.Г. Хабинов, И.А. Чалов, А.А. Власов, Е.Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009: Сборник материалов V Международного научного конгресса. – Новосибирск, 2009. – С.108–113.
- Каминский А.Е. Программа ZondTEM1D. URL: http://zondgeo.ru (дата обращения 20.05.2018).
- Результаты поисково-разведочных работ на полиметаллы методами электроразведки с контроллируемыми источниками в районе Рудного Алтая / С.М. Бабушкин, А.Н. Егоров, Н.Н. Неведрова, И.О. Шапаренко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 11. С. 97–110.
- Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. Мониторинг разломных зон методом электротомографии (на примере Горного Алтая) // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тезисы докладов VII Международного симпозиума. – Бишкек, 19–24 июня 2017. – С. 433–437.
- Geoelectrical resistivity variations and lithological composition in coastal gypsum rocks: A case study from the Lesina Marina area (Apulia, southern Italy) / V. Festa, S. Tripaldi, A. Siniscalchi, P. Acquafredda, A. Fiore, D. Mele, G. Romano // Engineering Geology. - 2016. - № 202. - P. 163-175.
- 20. Loke M.H. Resistivity and IP imaging // Geotomo Software Pty Ltd. – 2015. URL: http://www.geotomosoft.com (дата обращения 20.05.2018).
- Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling // European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. - 1996. - № 1. - P. 171-186.
- 22. Гришин М.М. Гидротехнические сооружения. М.: Энергия, 1968. 344 с.

Поступила 23.05.2018 г.

### Информация об авторах

Шалагинов А.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент Физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета.

*Неведрова Н.Н.*, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета.

Шапаренко И.О., младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Бабушкин С.М., заместитель директора Сейсмологического филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН. UDC 550.837+551.247.1+551.435.164

# APPLICATION OF METHODS OF ELECTRICAL EXPLORATION WITH CONTROLLED SOURCES FOR DETECTING CAUSES OF SUB-PASS-LOCATION PROCESSES DEVELOPMENT

Aleksandr E. Shalaginov<sup>1,2</sup>,

shalaginovae@ipgg.sbras.ru

Nina N. Nevedrova<sup>1,3</sup>, nevedrovann@ipgg.sbras.ru

Ilya O. Shaparenko<sup>1</sup>, shaparenkoio@ipgg.sbras.ru

# Sergey M. Babushkin<sup>4</sup>,

bab@gs.sbras.ru

- <sup>1</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
- <sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University,
   20, K. Marksa avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.
- <sup>3</sup> Novosibirsk State University,
   1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.
- <sup>4</sup> Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey»,
- 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the work is caused by insufficiency of knowledge on the reasons of development of suffusion processes expressed as land surface failures menacing to infrastructure of industrial production in Caspian Depression.

**The aim** of the research is to determine the near-surface and deep geoelectric structure of the site of manifestations of suffusion-subsidence formations to identify possible causes of their occurrence.

**Object** of the research are suffusion-subsidence formations in the form of funnel-shaped earth surface dips with a depth of 1 to 6 m in an amount of 15 pieces located in three practically parallel zones.

**Methods.** The entire volume of field data is obtained by three different depth methods of geoelectrics: electrotomography, vertical electric sounding, non-stationary electromagnetic sounding. Processing, interpretation, visualization of data were carried out using interactive simulation and inversion software packages ERA, EMS, Zond, Res2D, ERTLab. The justification of the results is based on the analysis and comparison of the obtained geoelectric data with a priori geological data.

**Results.** Based on the results of the work done, with depths of up to 400–500 m, sections and maps of electrical resistivity distribution at different depths, three-dimensional geoelectric models for both the near-surface and the deep part of the section were constructed. As a result of geological interpretation of the data, the zones were identified (according to the resistivity parameter) to which the existing funnels were confined, the direction of removal of the destroyed (washed out) rocks was determined. The authors identified the structures related to the zones of development of suffusion-subsidence processes, and stated possible reasons for their formation. **Conclusions.** The paper demonstrates high efficiency of the complex of electromagnetic methods used on the site with the destructive phenomena. It is concluded that the main mechanism for funnels formation is associated with leaching of limestone and salt «cement» from the N-Q sediments, with further unloading into deeper watered horizons. This complex can be recommended at the solution of similar tasks in other regions where there are zones of manifestation of suffusion processes, and also for monitoring their development.

### Key words:

Geoelectric structure, vertical electric sounding, electrotomography, non-stationary electromagnetic sounding, suffosion processes.

# REFERENCES

- Anikeev A.V. Suffoziya. Mekhanizm i kinematika svobodnoy suffozii [Mechanism and kinematics of free suffusion]. *Geoekologi*ya, 2006, no. 6, pp. 544–553.
- Anikeev A.V., Leonenko M.V. Prognoz provaloobrazovaniya pri izmenenii gidrodinamicheskogo rezhima na primere Dzerzhinskogo karstovogo rayona [Prediction of failure formation at changes of hydrodynamic regime on the example of the Dzerzhinsky karst region]. *Geoekologiya*. *Inzhenernaya geologiya*. *Gidrogeologiya*. *Geokriologiya*, 2013, no. 2, pp. 130–146.
- Akhmedenov K. M., Iskaliev D. Zh., Petrishev V. P. Karst and Pseudokarst of the West Kazakhstan (Republic of Kazakhstan). International Journal of Geosciences, 2014, no. 5, pp. 131–136.
- 4. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44 (1), pp. 131–152.
- Parshakov E.I. Issledovaniya zakarstovannosti uchastka metodov VEZ [Studies of karsts of the site by the VES methods]. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov*: sbornik nauchnykh trudov [Strategy and processes of georesources development: Sat. scientific work]. Perm, GI UrO RAN Publ., 2016. No. 14, pp. 234–235.
- Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon. *Extended Abstracts*, 22<sup>nd</sup> *EM Induction Workshop*. Weimar, Germany, August 24–30, 2014. pp. 4.

- Mogilatov V., Goldman M., Persova M., Soloveichik Y. Displacement currents in geoelectromagnetic problems. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 105, pp. 133–137.
- Chubarov M.V., Vlasov A.A., Shalaginov A.E. Postroenie trekhmernykh geoelektricheskikh modeley dlya metoda zondirovaniya stanovleniem polya v blizhney zone na osnove rezultatov odnomernoy inversii [Construction of three-dimensional geoelectric models for the TEM method based on the results of one-dimensional inversion]. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh. Geoekologiya. Materialy XIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology. Materials of the 13<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Novosibirsk, 2017. Vol. 4, pp. 129–134.
- 9. Babushkin S.M., Nevedrova N.N. Apparaturnye i metodicheskie sredstva pri poiskakh rudnykh mestorozhdeny metodom nestatsionarnogo elektromagnitnogo zondirovaniya [Instrumental and methodical means in the search for ore deposits by the method of nonstationary electromagnetic sensing]. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh. Geoekologiya. Materialy XIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geoecology. Materials of the 13<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Novosibirsk, 2017. Vol. 2, pp. 271–275.
- Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. Amsterdam, Elsevier, 2014. 794 p.
- Ivanov P.V., Alekseev D.A., Bobachev A.P., Pushkarev P.Yu., Yakovlev A.G. On integrated application of the VES and TEM geophysical methods. *Inzhenernye izyskaniya*, 2011, no. 11, pp. 42-51. In Rus.
- Balkov E.V., Fadeev D.I., Karin Yu.G., Manshteyn A.K., Manshteyn Yu.A., Panin G.L. A new approach to shallow-depth electromagnetic sounding. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 783-791. In Rus.
- Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review. *Earth-Science reviews*, 2014, no. 135, pp. 65–82.

- 14. Gelis C., Noble M., Cabrera J., Penz S., Chauris H., Cushing E.M. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, no. 173, pp. 573–589.
- 15. Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. Sistema interpretatsii dannykh zondirovaniya metodom perekhodnykh protsessov EMS [System for interpretation of transient electromagnetic sounding data EMS]. *GEO-Sibir-2009: Sbornik materialov V Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [Geo-Sibir. Materials of the V<sup>th</sup> International scientific congress]. Novosibirsk, 2009. pp. 108–113.
- Kaminsky A.E. Programma ZondTEM1D [ZondTEM1D]. Available at: http://zond-geo.ru (accessed 20 May 2018).
- 17. Babushkin S.M., Egorov A.N., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O. Results of exploration for polymetals by electrical survey methods with controlled sources in the Rudny Altai region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 97–110. In Rus.
- Shaparenko I.O., Nevedrova N.N. Monitoring razlomnykh zon metodom elektrotomografii (na primere Gornogo Altaya) [Monitoring of fault zones by electro-tomography (the example of Gorny Altai)]. Problemy geodinamiki i geoekologii vnutrikontinentalnykh orogenov. Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnogo simpoziuma [Problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens. Abstracts of the VII International Symposium]. Bishkek, 2017. pp. 433-437.
- 19. Festa V., Tripaldi S., Siniscalchi A., Acquafredda P., Fiore A., Mele D., Romano G. Geoelectrical resistivity variations and lithological composition in coastal gypsum rocks: A case study from the Lesina Marina area (Apulia, southern Italy). *Engineering Geology*, 2016, no. 202, pp. 163–175.
- Loke M.H. Resistivity and IP imaging. Geotomo Software Pty Ltd. 2015. Available at: http://www.geotomosoft.com (accessed 20 May 2018).
- Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 171–186.
- 22. Grishin M.M. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydrotechnical structures]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 344 p.

Received: 23 May 2018.

#### Information about the authors

*Aleksandr E. Shalaginov*, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; assistant professor, Novosibirsk State Technical University.

*Nina N. Nevedrova*, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; assistant professor, Novosibirsk State University.

*Ilya O. Shaparenko*, junior researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Sergey M. Babushkin, deputy director, Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey».

УДК 62-868:532.542.001.24

# СПОСОБ ВИБРОСТРУЙНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОХРАНЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ И НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

# Азин Антон Владимирович<sup>1</sup>,

antonazin@niipmm.tsu.ru

### Богданов Евгений Петрович<sup>2</sup>,

epbogdanov@mail.ru

### Пономарев Сергей Владимирович<sup>1</sup>,

psv@niipmm.tsu.ru

## Рикконен Сергей Владимирович<sup>1</sup>,

rikk2@yandex.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
- <sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью создания энергоэффективного способа сохранения текучести углеводородного топлива в условиях низких температур, при температурах существенно ниже температуры застывания продукта. В условиях низких температур высоких широт Сибири и Арктики имеются проблемы с запуском энергетических установок, работающих на углеводородном топливе и маслах. Применяемые термические и химические методы сохранения текучести топлива, масла и охлаждающей жидкости не дают полной гарантии в оперативной подготовке к работе автономных объектов. Вибрационные технологии могут существенно изменить реологические свойства углеводородного топлива посредством создания высоких сдвиговых скоростей и гистерезисного нагрева нефтепродуктов. Процесс вибрационного создания высоких сдвиговых скоростей сплошной среды имеет затраты энергии в десятки раз меньше, чем термический метод сохранения текучести топлива.

Низкая теплопроводность углеводородного топлива способствует образованию возле внутренних стенок резервуаров застывшего топлива, которое является теплоизоляцией. При внесении внутрь резервуара механической вибрационной мощности топливо внутри данной системы будет достаточно жидким и готовым к применению по требованию.

**Цель:** создание методики расчета теплоизоляционного эффекта застывшего нефтепродукта, определение количества энергии, необходимой для поддержания топлива в жидком состоянии при разных температурах окружающей среды.

**Методы:** математический расчет перепада температур в системе «стенка резервуара – слой застывшего топлива» и экспериментальные исследования изменения реологических свойств нефтепродуктов под воздействием системы затопленного вибрирующего конфузора.

**Результаты**. Предложен инженерный метод расчета толщины застывшего топлива на внутренних стенках резервуара при отрицательных температурах окружающей среды и величины механической энергии, необходимой для сохранения текучести топлива.

#### Ключевые слова:

Жидкий, вязкость нефти, вибратор, сила, механическое воздействие.

### Введение

В настоящее время Россия интенсифицировала работы по освоению Арктики и Антарктики. По многолетнему опыту освоения западной и восточной Сибири известны постоянные проблемы с применением углеводородного топлива и масел в условиях низких температур. Применение депрессаторов (химических реагентов, применяемых для снижения вязкости продукта) имеет ограниченный эффект из-за временного эффекта – после повторного нагрева топлива (при нагреве топлива в баках и резервуарах) свойства депрессатора пропадают. Немалая стоимость депрессаторов входит в стоимость топлива. Работники нефтяных и газовых месторождений, военные, гражданские жители круглосуточно применяют термический метод приведения застывшего топлива в жидкое состояние, что является дорогим, длительным и небезопасным способом. Следовательно, на практике острой проблемой является сохранение текучести углеводородных топлив и масел в условиях низких температур [1].

Поэтому актуальной проблемой является разработка метода сохранения текучести топлив при температурах, существенно ниже температуры застывания продукта, который был бы относительно дешевым, безопасным и существенно сократил время подготовки автономных и стационарных объектов к работе.

#### Постановка задачи

В научных источниках [2–8] описано, что изменения реологических свойств углеводородных топлив можно достичь следующими способами: термическим, химическим или воздействием разнообразных физических полей. Причем, в зависимости от конкретного способа воздействия, затрачиваемая энергия будет разная. Например, термический способ сохранения текучести в десятки раз более энергозатратен, чем виброструйный гидродинамический способ.

Основной метод, распространенный во всем мире, – термический способ сохранения текучести топлив. Этот способ существенно более энергозатратен из-за низкой теплопроводности и высокой теплоёмкости нефтепродуктов. Постоянная времени нагрева в этом методе по тем же причинам очень высокая, т. е. продукт долго нагревается и приходит в рабочее состояние. При повторном нагреве реологические свойства топлива ухудшаются из-за испарения легких фракций и, чтобы достичь первоначальных реологических свойств, необходимо нагревать топливо до более высокой температуры.

Для повышения тактико-технических характеристик стационарных и подвижных автономных объектов, работающих в условиях высоких широт, предлагается использовать принцип виброструйного гидродинамического сохранения текучести углеводородных топлив и масел. Технические устройства, создающие виброструйные гидродинамические затопленные струи, могут отличаться по способу преобразования электрической энергии в гидродинамическую энергию [3–11].

Этот принцип позволяет:

- за счет высоких сдвиговых скоростей сплошной среды разрушать надмолекулярную структуру нефтепродуктов, тем самым сохранять текучесть при температуре, намного ниже температуры застывания продукта;
- за счет потерь на трение при высоких сдвиговых скоростях производить нагрев нефтепродукта;
- существенно снижать испарение легких фракций за счет нагрева нефтепродукта изнутри массы сплошной среды;
- осуществлять нагрев топлива в 3-4 раза быстрее, чем при термическом нагреве;
- теоретически сокращать затраты энергии на разжижение и нагрев нефтепродукта в 30–100 раз по сравнению с термическим методом.

Течение охлажденных топливных жидкостей существенным образом отличается от ньютоновских жидкостей, что иллюстрирует рис. 1 [2].



**Рис. 1.** Кривые течения ньютоновской (1) и неньютоновской (2) жидкостей



Нелинейность зависимости напряжений сдвига  $\tau$  и скорости сдвига  $\gamma$  для неньютоновских жидко-

стей (2) вызывает более высокие абсолютные значения показателей вязкости по сравнению с ньютоновскими жидкостями (1), что в большей степени проявляется в области малых скоростей. Эффективная вязкость таких жидкостей при малых скоростях во многом определяется величиной  $\tau_d$  – предельным значением динамического напряжения сдвига. Кроме этого, многие неньютоновские жидкости, в том числе топливо, масло, сырая нефть, промывочные и цементные растворы, в определенных условиях способны образовывать структуру и терять вследствие этого свою текучесть.

Переход таких жидкостей из нетекучего в текучее состояние происходит при постепенном росте усилия. Одной из определяющих причин такого поведения неньютоновских жидкостей является присутствие в их составе структурообразующих компонент, находящихся во взвешенном состоянии. Для сырой нефти и углеводородных топлив, в соответствующих условиях, это кристаллы парафинов и смолы.

Течение высокопарафинистых нефтей удовлетворительно описывается уравнением Шведова-Бингама с использованием двух параметров: пластической вязкости  $\mu_p$  и динамического напряжения сдвига  $\tau_d$ . Динамическое напряжение сдвига характеризует прочность структуры нефти в условиях непрерывной деформации:

$$\mu_{ef} = \mu_p + rac{ au_d}{\gamma},$$

где  $\mu_p$  – пластическая вязкость, Па·с;  $\tau_d$  – динамическое напряжения сдвига, Па;  $\gamma$  – скорость сдвига, 1/с;  $\mu_{et}$  – эффективная вязкость, Па·с.

Разнообразные воздействия физическими полями существенно изменяют величину динамического напряжения сдвига, и в меньшей степени – пластическую вязкость [3–12].

При снижении температуры окружающей среды все углеводородные продукты изменяют свои реологические свойства: за счет образования устойчивой надмолекулярной парафиновой структуры резко увеличивается вязкость топлива и масла (рис. 2).



Рис. 2. Механизм образования (застывания) парафиновой кристаллической (надмолекулярной) структуры нефтепродукта при снижении температуры [12]

Fig. 2. Mechanism of formation (solidification) of paraffinic crystalline (supramolecular) structure of oil product with temperature decrease [12]

Со временем за счет испарения легких фракций с открытых поверхностей углеводородного топлива в резервуарах, полимеризации, окисления и других химических реакций углеводородное топливо «стареет» – качество падает. Кроме этого, в холодную погоду все топлива и масла приобретают жесткую надмолекулярную структуру и прекращают течь по топливной системе, что приводит к невозможности пуска двигателей, работающих на углеводородном топливе (мазуте и солярке). Данная ситуация существенно снижает оперативность пуска энергетических установок или ведет к существенным затратам топлива на обогрев мазута, солярки и масла на уровне температуры подготовки к сжиганию. Ситуация усугубляется при наличии в топливе воды, которая может попасть в мазут или солярку во время транспортировки.

Основными теплофизическими свойствами мазута являются: вязкость, плотность, теплоемкость и теплопроводность.

Удельная теплоемкость мазутов при (20-100) °C составляет 1,74 кДж/кг.°C.

Теплопроводность мазута весьма мала и составляет (0,12–0,16)  $BT/M^{\circ}C$ .

Вязкость зависит от температуры, давления и предварительной термической обработки топлива. Зависимость вязкости мазута M-100 от температуры показана на рис. 3.



Рис. 3. Изменение эффективной вязкости мазута марки М-100 в зависимости от температуры при разных сдвиговых скоростях

Fig. 3. Change of the M-100 oil fuel effective viscosity depending of temperature at different shear rates



вой скорости течения

Fig. 4. Change of fuel oil viscosity depending of the shear flow rate

Плотность мазута различных марок меняется в пределах (0,95–1,06) т/м<sup>3</sup> (таблица).

Таблица.	Температурные	характеристики	мазута	различ-
	ных марок			

 Table.
 Temperature characteristics of the fuel oil of various grades

0								
Марка мазута Fuel oil grade	Температура застывания	Температура вспышки Burst temperature						
	Pour point	°C	Burst temperature					
	0							
M-40	10	25	90					
M-60	25	40	100					
M-100	25	40-50	100					
TKM-16	38	70	90-100					

За счет потерь на трение при высоких сдвиговых скоростях движения среды (топлива, масла) происходит гистерезисный нагрев и одновременно разрушение надмолекулярной структуры среды. При этом значения вязкости мазута можно сохранять на низком уровне даже при отрицательных температурах. Тепловые характеристики среды в этом процессе не участвуют, и значения теплопроводности не имеют значение, следовательно, требуется существенно меньше энергии, необходимой для достижения заданной вязкости, чем при нагреве.

На рис. 3, 4 показаны типичные кривые вязкости в зависимости от сдвиговых скоростей движения. Одних и тех же значений вязкости можно достичь и нагревом, и сдвиговой скоростью. С уменьшением температуры значения сдвиговых скоростей для достижения одной и той же вязкости должны быть выше.

### Численные результаты

Низкая теплопроводность мазутов обуславливает особенности их застывания в цистернах при транспортировке. На рис. 5 показано распределение температуры мазута от стенки к оси котла цистерны, полученное опытным путем. Здесь кривая 1 характеризует распределение температуры мазута в цистерне через час после погрузки, кривые 2-5-соответственно через 18, 40, 72 и 120 часов транспортировки мазута. Температура мазута при загрузке примерно 75 °С, а температура окружающей среды изменялась от -6 до -2 °С. Таким образом, даже при длительном остывании лишь тонкий пристеночный слой мазута имеет температуру, близкую к температуре наружной среды, а в центре цистерны температура мазута близка к температуре слива (рис. 5).

Расчет проводится в предположении, что резервуар имеет внутренний источник энергии.

Таким образом, даже при длительном остывании лишь тонкий пристеночный слой мазута имеет температуру, близкую к температуре наружной среды, а в центре котла цистерны температура мазута близка к температуре слива. При наличии небольшого по величине источника энергии внутри резервуара (цистерны) и обеспечении должной теплоизоляции большая часть топлива будет находится в жидком состоянии [14–23].



Рис. 5. Распределение температуры мазута от стенки к центру цистерны. R – расстояние от центра резервуара до стенки

Fig. 5. Fuel oil temperature distribution from the wall to the center of the tank. R is the distance from the center of the tank to the wall



**Рис. 6.** Определение толщины застывшего мазута в зависимости от температуры окружающей среды и температуры застывания мазута: а) схема теплового расчета; b) зависимость толщины структурированного мазута от температуры среды

Fig. 6. Determination of the solidified fuel oil thickness, depending on the ambient temperature and the freezing temperature of fuel oil: a) scheme of thermal calculation; b) dependence of the thickness of structured fuel oil on the temperature of the medium



- Рис. 7. Схема установки по поддержанию текучести топлива в условиях низких температур с использованием виброструйного электромагнитного активатора ВЭМА- 0.3
- Fig. 7. Installation scheme for maintaining fuel fluidity at low temperatures using VEMA-0.3 vibrating-jet electromagnetic activator

В настоящее время в технике имеется устройство, создающее высокие сдвиговые скорости в сплошной среде – виброструйный электромагнитный активатор ВЭМА-0.3, работающий на принципе виброструйного гидродинамического активатора.



Рис. 8. Зависимость эффективной вязкости от времени виброструйного воздействия: 1 – нефть Останинского месторождения; 2 – нефть Южно-Табаганского месторождения; 3 – нефть Урманского месторождения

Fig. 8. Dependence of the effective viscosity on vibratory action time: 1 is the Ostaninskoe oil; 2 is the oil of the South Tabagan field; 3 is the oil from the Urmansky field



- Рис. 9. Влияние времени виброобработки на температуру застывания нефтей и мазута: 1 – нефть Таймурзинская; 2 – мазут
- Fig. 9. Influence of vibro-processing time on freezing point of the oil and fuel oil: 1 is the Taimurzinskaya oil; 2 is the fuel oil



Рис. 10. Образование мелких дендритных кристаллов парафина, неспособных к кристаллизации после виброструйной обработки

Fig. 10. Formation of small dendritic paraffin crystals, incapable of crystallization after vibratory blasting

### Выводы

- Необходимую вязкость и температуру топлива и масла можно получить не только энергозатратным термическим способом, но и организацией высоких сдвиговых скоростей топлива в зоне хранения.
- Затраты энергии по сохранению текучести топлива и масла при использовании высоких сдвиговых скоростей топлива в зоне обработанного нефтепродукта при хранении в десятки раз меньше, чем при применении термического способа.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рикконен С.В., Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В. Результаты физико-химической обработки высокозастывающих нефтей // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций. – Томск: ИД ТГУ, 2018. – С. 633–634.
- Structural properties of gelled Changqing waxy crude oil benefitted with nanocomposite pour point depressant / B. Yao, C. Li, F. Yang, Y. Zhang, Z. Xiao, G. Sun // Fuel. - 2016. - V. 184. -P. 544-554.
- The depressor ability of polyalkyl acrylate additives after ultrasonic treatment / G.I. Volkova, R.V. Anufriev, N.V. Yudina, O.N. Chaykovskaya // Russian Physics Journal. 2016. V. 59 (8). P. 132-136.
- Cherry E.M. Three dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2010. V. 31. P. 569-575.
- Viscosity of Liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Data / D.S. Viswanath, T.K. Ghosh, D.H.L. Prasad, N.V.K. Dutt, K.Y. Rani. - Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007. -660 p.
- Расчет гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 67–75.
- Расчет энергетических параметров затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 16–23.
- Данекер В.А., Рикконен С.В. Приготовление и коррекция показателей бурового раствора технологией и оборудованием // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 86–92.
- Ткачев О.А., Тугунов П.И. Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. – М.: Недра, 1988. – 116 с.
- Shives M.R. Hydrodynamic Modeling, Optimization and Performance Assessment for Ducted and Non-ducted Tidal Turbines: thesis M.A.Sc: - B.Eng., 2011. 24 p.
- Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct // International Journal of Engineering & Technology. - 2011. - V. 11. - № 3. - P. 186-196.

- 3. Организацию высоких сдвиговых скоростей течения топлива в резервуарах можно осуществить применением маломощных виброструйных вибраторов разной конструкции.
- При достаточной теплоизоляции резервуаров с учетом теплоизоляционных свойств структурированного углеводородного топлива поддержание топлива и масла в жидком состоянии можно осуществлять маломощными виброструйными вибраторами, работающими постоянно.
- Величиной вязкости и температуры топлива и масла возможно управлять посредством времени работы вибратора.
- Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow // Proc. Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. – Vancouver BC, Canada, 2008. – P. 473–479.
- Dutt N.V.K., Prasad D.H.L. Representation of the Temperature Dependence of the Viscosity of Pure Liquids // Private Communication, Chemical Engineering Division. – Hyderabad: Indian Institute of Chemical Technology, 2004. – P. 128–136.
- Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers // International Journal of Engineering Research and Applications. - 2012. - V. 2. - Iss. 3. - P. 2348-2351.
- Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the Bay of Fundy. – 2013. URL: https:// doi.org/10.1098/rsta.2012.0189 (дата обращения: 10.02.2019).
- The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines / W. Batten, A. Bahaj, A. Molland, J. Chaplin // Renewable Energy. - 2008. - V. 33. - P. 1085-1096.
- Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separated flows in axisymmetric diffusers // International Journal of Engineering, Science and Technology. - 2011. - V. 3. - № 2. -P. 104-109.
- Shives M. Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator line CFD method. – Greater Victoria: University of Victoria, 2011. – 120 p.
- Tao R., Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field // Energy & Fuels. 2006. V. 20. -P. 2046-2051.
- Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V. Improving the Structural-Rheological Properties of High-Paraffin Crude Oil Using Chemical Reagents and Vibrational Treatment // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2011. – V. 5. – P. 21–24.
- Mal'tseva E.V., Bogoslovskii A.V., Yudina N.V. Application of the low-frequency vibratory method for determining the paraffin crystallization onset in dispersed petroleum systems // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2012. - V. 85. - P. 751-754.
- 22. Данекер В.А. Расчет и конструирование электромагнитных преобразователей для активации жидких систем. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 102 с.
- Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационом электромагнитном активаторе / А.Н. Гаврилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213.

Поступила: 18.02.2019 г.

### Информация об авторах

*Азин А.В.*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Богданов Е.П., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Пономарев С.В.**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

*Рикконен С.В.*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета. UDC 62-868:532.542.001.24

# METHOD OF VIBRO-JET HYDRODYNAMIC TECHNOLOGY TO RETAIN THE FLUIDITY OF HYDROCARBON FUELS AND PETROLEUM PRODUCTS AT LOW TEMPERATURES

# Anton V. Azin<sup>1</sup>,

antonazin@niipmm.tsu.ru

**Evgeniy P. Bogdanov**<sup>2</sup>, epbogdanov@mail.ru

Sergey V. Ponomarev<sup>1</sup>,

psv@niipmm.tsu.ru

### Sergey V. Rikkonen<sup>1</sup>,

rikk2@yandex.ru

- <sup>1</sup> Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is cased by the need to develop an energy-efficient way to maintain the fluidity of hydrocarbon fuels at low temperatures, at temperatures significantly lower the freezing point of the product. Under conditions of low temperatures of high latitudes of Siberia and Arctic, there are problems with the launch of power plants operating on hydrocarbon fuels and oils. Thermal and chemical methods used to preserve the fluidity of fuel, oil and coolant fluid do not provide a complete guarantee in operational preparation for operation of autonomous objects. Vibration technologies can significantly change the rheological properties of hydrocarbon fuels by creating high shear rates and hysteresis heating of petroleum products. The process of vibratory creation of high shear velocities in a continuous medium has energy costs ten times less than the thermal method for maintaining fuel flow. The low thermal conductivity of hydrocarbon fuel contributes to formation of solidified fuel near the inner walls of the tanks, which are the thermal insulation. Introducing a mechanical vibration power inside the tank, the fuel inside this system will be sufficiently liquid and ready for use on demand.

**The main aim** of the research is to create a method for calculating heat-insulating effect of a frozen petroleum product, to determine the amount of energy required to maintain the fuel in a liquid state at different ambient temperatures.

**Methods:** mathematical calculation of the temperature difference in the system «tank wall – layer of solidified fuel» and experimental studies of changes of rheological properties of petroleum products under the influence of a submerged vibrating confuser system. **Results.** The authors have proposed the engineering method for calculating frozen fuel thickness on the inner walls of the tank at negative ambient temperatures and the amount of mechanical energy required to maintain fuel fluidity.

#### Key words:

Liquid, oil viscosity, vibrator, force, mechanical action.

### REFERENCES

- Rikkonen S.V., Loskutova Yu.V., Yudina N.V. Rezultaty fizikokhimicheskoy obrabotki vysokozastyvayushchikh neftey [The results of physico-chemical treatment of high-solidifying oils]. *Perspektivnye materialy s ierarkhicheskoy strukturoy dlya novykh tekkhnologiy i nadezhnykh konstruktsy* [Non-conventional materials with hierarchy structure for new technologies and reliable constructions]. Tomsk, TGU Publ. house, 2018. pp. 633-634.
- Yao B., Li C., Yang F., Zhang Y., Xiao Z., Sun G. Structural properties of gelled Changqing waxy crude oil benefitted with nanocomposite pour point depressant. *Fuel*, 2016, vol. 184, pp. 544-554.
- Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V., Chaykovskaya O.N. The depressor ability of polyalkyl acrylate additives after ultrasonic treatment. *Russian Physics Journal*, 2016, vol. 59 (8), pp. 132–136.
- Cherry E.M. Three dimensional velocity measurements in annular segments including the effects of upstream strut wake. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2010, vol. 31, pp. 569–575.
- Viswanath D.S., Ghosh T.K., Prasad D.H.L., Dutt N.V.K., Rani K.Y. Viscosity of Liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Data. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2007. 660 p.

- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 67–75. In Rus.
- Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Calculation of energy parameters of submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 16-23. In Rus.
- Daneker V.A., Rikkonen S.V. Preparation and correction of drilling mud by technology and equipment of Vibro Jet Magnetic Activation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 86–92. In Rus.
- Tkachev O.A., Tugunov P.I. Sokrashchenie poter nefti pri transporte i khranenii [Reducing oil losses at transport and storage]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 116 p.
- 10. Shives M.R. Hydrodynamic Modeling, Optimization and Performance Assessment for Ducted and Non-ducted Tidal Turbines: thesis M.A.Sc: B.Eng., 2011. 24 p.
- Shina P.K., Das A.K., Majumdar B. Numerical Investigation of flow through Annular Diffusing Duct. *International Journal of Engineering & Technology*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 186–196.

- Gant S., Stallard T. Modelling a tidal turbine in unsteady flow. Proc. Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver BC, Canada, 2008. pp. 473–479.
- Dutt N.V.K., Prasad D.H.L. Representation of the Temperature Dependence of the Viscosity of Pure Liquids. *Private Communication, Chemical Engineering Division.* – Hyderabad, Indian Institute of Chemical Technology, 2004. pp. 128–136.
- Keerthana R., Jamuna R.G. Flow analysis of annular diffusers. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012, vol. 2, Iss. 3, pp. 2348–2351.
- Karsten R., Swan A., Culina J. Assessment of arrays of in-stream tidal turbines in the Bay of Fundy. 2013. Available at: https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0189 (accessed: 10 February 2019).
- Batten W., Bahaj A., Molland A., Chaplin J. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, pp. 1085–1096.
- Sagar D., Paul A.R., Jain A. Experimental investigations of flow computational fluid dynamics investigation of turbulent separated flows in axisymmetric diffusers. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 104–109.
- Shives M. Evaluation of discrete blade effects for ducted turbines using an actuator line CFD method. Greater Victoria, University of Victoria, 2011. 120 p.

- Tao R., Xu X. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy & Fuels*, 2006, vol. 20, pp. 2046-2051.
- Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V. Improving the Structural-Rheological Properties of High-Paraffin Crude Oil Using Chemical Reagents and Vibrational Treatment. *Chemistry* and Technology of Fuels and Oils, 2011, vol. 5, pp. 21–24.
- Mal'tseva E.V., Bogoslovskii A.V., Yudina N.V. Application of the low-frequency vibratory method for determining the paraffin crystallization onset in dispersed petroleum systems. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, pp. 751–754.
- Daneker V.A. Raschet i konstruirovanie elektromagnitnykh preobrazovateley dlya aktivatsii zhidkikh sistem [Calculation and design of electromagnetic transducers for activation of liquid systems]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2018. 102 p.
- 23. Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus.

Received: 18 February 2019.

### Information about the authors

Anton V. Azin, Cand Sc., scientific associate, Tomsk State University.

Evgeniy P. Bogdanov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey V. Ponomarev, Dr. Sc., professor, Tomsk State University.

Sergey V. Rikkonen, Cand Sc., senior researcher, Tomsk State University.

УДК 550.834; 621.373

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНОГО УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА В УСТРОЙСТВЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

# Пустынников Сергей Владимирович<sup>1</sup>,

pustynnikov@tpu.ru

Носов Геннадий Васильевич<sup>1</sup>,

nosov@tpu.ru

Хан Вей<sup>2</sup>,

whan@jlu.edu.cn

# Носова Мария Геннадьевна<sup>3</sup>,

nosovamgm@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

# <sup>2</sup> Цзилиньсий университет, КНР, 130012, г. Чанчунь, пр. Чянцзина, 2699.

<sup>3</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки новых источников мощных импульсов тока для работы на электрогидравлический излучатель с раздвигающимися электродами, который может применяться для возбуждения сейсмических волн в невзрывной сейсморазведке.

**Цель:** провести расчетные и экспериментальные исследования работы низковольтного ударного генератора на дугу в воде, инициированную раздвигающимися электродами в режиме одиночных импульсов и при получении серии импульсов давления. Провести оптимизацию параметров ударного генератора и электрогидравлического излучателя с целью получения максимального импульса давления.

**Объекты:** низковольтный ударный генератор, выполненный в габаритах кранового асинхронного двигателя МТН-612, подключенный к электрогидравлическому излучателю с раздвигающимися электродами.

**Методы:** согласование параметров ударного генератора и дугового разряда методом планирования эксперимента с помощью математической модели.

**Результаты.** Проведены лабораторные исследования работы низковольтного ударного генератора на дугу в воде, инициированную раздвигающимися электродами в режиме одиночных импульсов и при получении серии импульсов. Методом планирования эксперимента получена математическая модель работы ударного генератора на дугу в воде, инициированную раздвигающимися электродами в режиме одиночных импульсов, получены уравнения регрессии для выходных параметров дугового разряда, проведена оптимизация параметров ударного генератора и электрогидравлического излучателя, что позволяет получить максимальный импульс давления для проведения малоглубинной сейсморазведки. Полученный амплитудно-частотный спектр импульса давления показал, что основная энергия импульса давления лежит в среднечастотном диапазоне от 50 до 100 Гц, что обеспечивает высокий сейсмический КПД для проведения малоглубинной сейсморазведки.

#### Ключевые слова:

Ударный генератор, электрогидравлический излучатель, раздвигающиеся электроды, математическая модель, осциллограмма, сейсморазведка.

### Введение

В настоящее время электрогидравлический эффект имеет широкое применение в промышленных технологиях [1–9]:

- различные виды очистки;
- снятие внутренних напряжений;
- штамповка;
- сварка;
- электрогидравлические молоты и вибраторы;
- электрогидравлические насосы;
- дробление и измельчение;
- (де)эмульгация;
- обеззараживание;
- медицинские технологии;
- морская и наземная сейсморазведка.

Создание сейсмических волн при помощи взрыва заряда взрывчатого вещества на поверхности или в скважине традиционно применяется в сейсморазведочный работах. Однако такой метод имеет ограниченное применение и не может использоваться в местах поселений, вблизи мостов, линий электропередач, железных дорог и т. д. Кроме того, взрывной метод наносит значительный вред окружающей среде [10]. В настоящее время получила развитие невзрывная сейсморазведка, позволяющая упростить производство работ, обеспечить безопасное их проведение для обслуживающего персонала и окружающей среды. К таким методам относится возбуждение сейсмических волн с помощью вибрационных источников, импульсных невзрывных источников, использующих энергию выхлопа в воду сильно сжатого воздуха, а также электрогидравлических источников, которые позволяют возбуждать сейсмические волны при помощи электрического разряда в воде, вызывающего импульсное преобразование электрической энергии в энергию упругой волны давления [11].

По месту проведения сейсморазведка подразделяется на наземную (полевую), акваториальную (морскую), скважинную и подземную, а по частотам колебаний используемых упругих волн можно выделить высокочастотную (частоты свыше 100 Гц), среднечастотную (частоты в несколько десятков Гц) и низкочастотную (частоты менее 10 Гц) сейсморазведку. Чем выше частота упругих волн, тем больше их затухание и меньше глубинность сейсморазведки [12].

Существующие в настоящее время установки для электрогидравлического возбуждения сейсмических колебаний используют в качестве накопителей импульсной энергии конденсаторные батареи. 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 [13, 14]. К недостаткам таких установок следует отнести наличие высокого напряжения, снижающего безопасность работ, и высокочастотный спектр возбуждаемых волн давления, обусловливающий низкий сейсмический КПД.

В устройствах электрогидравлического воздействия, требующих получения импульсов давления невысокой амплитуды (до 10 МПа) и большой длительности (5–10 мс), целесообразным является применение электромашинных источников импульсов тока (ударных генераторов). Однако имеются трудности, связанные с инициированием электрического разряда вследствие невысокого напряжения статорной обмотки (до 1 кВ), уровень которого определяется наиболее эффективным использованием активного объёма генератора.

Впервые исследования применения ударного генератора для возбуждения сейсмически колебаний были выполнены в Томском политехническом институте [15]. Инициирование канала разряда осуществляется предварительным разрядом высоковольтной конденсаторной батареи или при низком напряжении - взрывающимися проволочками. В первом случае требуется защита низковольтного ударного генератора от высокого напряжения, что значительно усложняет схему устройства, во втором случае работа электрогидравлического устройства возможна только в режиме единичных воздействий, т. к. взрывающуюся проволочку необходимо периодически заменять. 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, при этом длительность

импульса тока в нагрузке по результатам эксперимента составляла порядка  $t_{\text{имп}} \approx 5-10 \text{ мс} [16, 17].$ 

Основное внимание в статье уделяется проведённым в Томском политехническом университете исследованиям работы низковольтного ударного генератора, выполненного в габаритах асинхронного двигателя МТН-612 на электрогидравлический излучатель, состоящий из предварительно замкнутых электродов, которые расходятся под действием электродинамических усилий при протекании тока ударного генератора и растягивают электрическую дугу, загорающуюся между электродами [18].

### Постановка задачи

Силовая схема лабораторного устройства для работы ударного генератора на дугу с изменяющейся длиной межэлектродного промежутка показана на рис. 1.



- Рис. 1. Силовая схема лабораторного устройства: УГ ударный генератор; VS – тиристорный коммутатор; 1 – основание; 2 – токоподводы; 3 – гибкие проводники; 4 – подвижные электроды; 5 – шарниры; 6 – контакты; 7 – возвратная пружина
- Fig. 1. Power circuit of the laboratory device: VΓ is the shock generator; VS is the thyristor switch; 1 is the circuit board; 2 is the hollow conductor; 3 is the flexible conductor; 4 are the moving electrodes; 5 is the gimbal; 6 are the power contacts; 7 is the return spring

Ударный генератор – УГ через тиристорный коммутатор – VS подключён к электрогидравлическому излучателю, помещённому в бак с водопроводной водой. На текстолитовом основании – 1 электрогидравлического излучателя размещены токоподводы – 2 к гибким проводникам – 3, которые подключены к подвижным электродам – 4, вращающимся на шарнирах – 5. Подвижные электроды – 4 имеют контакты – 6, прижатые друг к другу возвратной пружиной – 7. Ударный генератор УГ приводится во вращение и возбуждается до номинальной ЭДС. После включения тиристорного коммутатора – VS ток короткого замыкания идёт через токоподводы – 2, гибкие проводники – 3, через медные подвижные электроды – 4 и замкнутые контакты – 6. Возникающие электродинамические усилия, преодолевая силу возвратной пружины – 7, раздвигают подвижные электроды – 4, между контактами – 6 загорается электрическая дуга, формирующая упругую волну давления. После прохождения положительного импульса тока дуга гаснет, и подвижные электроды – 4 возвращаются в исходное состояние силой возвратной пружины – 7.

Задачами данной статьи являются экспериментальные исследования лабораторной модели устройства, создание математической модели работы ударного генератора на дугу, инициированную раздвигающимися электродами, проведение расчётов с помощью математической модели с целью оптимизации параметров электрогидравлического излучателя для получения максимального импульса волны давления, применяемого в малоглубинной сесморазведке.

#### Экспериментальные исследования

Лабораторные исследования физической модели электрогидравлического излучателя (рис. 2) были проведены с помощью ударного генератора, выполненного в габаритах асинхронного двигателя МТН-612 (рис. 3). Ударный генератор имеет следующие параметры: действующее напряжение статорной обмотки U=280 В, ударный ток внезапного короткого замыкания  $I_{yg}=28$ кА, частота вращения ротора n=3000 об/мин, что соответствует частоте ЭДС f=50 Гц. Электрогидравлический излучатель погружался в бак с водопроводной водой на глубину 0,5 м.



Puc. 2. Физическая модель электрогидравлического излучателя Fig. 2. Physical model of electrohydraulic source



Рис. 3. Ударный генератор в габаритах асинхронного двигателя МТН-612

#### Fig. 3. Shock generator in the dimensions of the asynchronous motor MTN-612

Для регистрации угла поворота подвижных электродов вместо одного из шарниров, на которых поворачиваются подвижные электроды, поставлен движок переменного сопротивления СПО. Изменение падения напряжения на сопротивлении фиксируется осциллографом. На рис. 4 показана типичная осциллограмма тока дуги I, напряжения дуги U и угла поворота раздвигающихся электродов  $\varphi$ . Длина подвижных электродов L=0,14 м, максимальная длина дуги l=0,08 м, угол включения тиристорного коммутатора  $\alpha=0^{\circ}$ .



- Рис. 4. Осциллограмма тока дуги I, напряжения дуги U, угла поворота раздвигающихся электродов ф
- Fig. 4. Oscillogram of arc current I, arc voltage U, rotation angle of moving electrodes  $\varphi$

На рис. 5 приведены временные зависимости сопротивления r, мощности p и энергии w дуги при тех же параметрах электрогидравлического излучателя. Характерной особенностью кривой сопротивления r является то, что в начальный момент



Рис. 5. Сопротивление г, мощность р и энергия w дуги

#### Fig. 5. Resistance r, power p and energy w of the arc

времени сопротивление межэлектродного промежутка определяется сопротивлением окисной плёнки поверхности электродов. Для стальных электродов оно составляет порядка 0,04 Ом. После момента начала движения электродов кривая изменения сопротивления дуги является типичной для дугового разряда ударного генератора.

При лабораторных испытаниях устройства была исследована возможность получения серии импульсов, состоящих из 5-10 подводных взрывов с частотой следования 25 Гц. На рис. 6 приведены осциллограммы тока I и напряжения дуги U при непрерывной работе ударного генератора на раздвигающиеся электроды. Из осциллограмм следует, что амплитуда импульсов тока снижается вследствие уменьшения кинетической энергии ротора. Материал контактов подвижных электродов находится под воздействием высокой температуры горения дуги до 7000 °C, поэтому при длительном горении дуги до 10 мс наблюдается эрозия электродов. При испытаниях применялся различный материал контактов: вольфрам, сталь, углеграфит. Углеграфит разрушался после 1-2 взрывов,

сталь выдерживала 10-15 взрывов, вольфрам - 50-70 взрывов.

### Теоретические исследования

Проведённые экспериментальные исследования позволили скорректировать формулу Теплера для расчёта сопротивления дугового канала для стальных электродов [19]:

$$r = k \cdot l \cdot e^{\sqrt{\delta t}} / \int_{0}^{t} i \cdot dt , \qquad (1)$$

где *k*=0,02 В·с/м – постоянный коэффициент; *l* – длина дуги, м; *t* – время, с.

Коэффициент  $\delta$  скорректирован при обработке осциллограмм и определяется по формуле:

$$\delta = a \cdot t^b + c, \tag{2}$$

где коэффициенты *a*=3,4 1/с, *b*=-1,344, *c*=4700, подобраны методом наименьших квадратов.

Формулы (1), (2) позволяют определить сопротивление дуги при работе ударного генератора для известного значения длины дуги в данный момент времени с достаточной для инженерных расчётов точностью.



Рис. 6. Осциллограммы тока дуги І при непрерывной работе ударного генератора на раздвигающиеся электроды

Fig. 6. Oscillograms of arc current I during continuous operation of the shock generator on moving electrodes

Электромагнитная энергия, передаваемая генератором в электрическую дугу, преобразуется в механическую энергию парогазового пузыря. При изменении геометрических размеров системы подвижных электродов в значительной степени изменяются параметры разряда: амплитуда тока  $I_m$ , длительность горения дуги  $t_d$ , величина вводимой в дугу энергии w, амплитуда импульса давления  $N_m$ .

Для расчёта амплитуды импульса давления применялась формула, приведённая в [11]:

$$N_m = \frac{k_p \cdot H / l}{\sqrt{H}} \cdot \rho_0^{3/8} \cdot \left[\frac{w}{l}\right]^{5/8} \cdot t_d^{-3/4},$$

здесь H, м – расстояние от оси межэлектродного промежутка до точки измерения, с учётом диаметра скважины, в которой должен находиться электрогидравлический излучатель: H=0,1 м;  $k_p$  – коэффициент, зависящий от соотношения H/l, для H/l от 0 до 2,6  $k_p=0,46$ ;  $\rho_0=103$  кг/м<sup>3</sup> – объёмная плотность водопроводной воды.

Согласование параметров ударного генератора и дугового разряда осуществлялось методом планирования эксперимента с помощью математической модели [20]. Система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в обмотках ударного генератора и в цепи нагрузки, имеет вид [21]:

$$\begin{cases} d\psi_a/dt = -(r_a + r) \cdot i; \\ d\psi_{fd}/dt = U_f - r_{fd} \cdot i_{fd}; \\ d\psi_{yd}/dt = -r_{yd} \cdot i_{yd}; \\ d\psi_{yq}/dt = -r_{yq} \cdot i_{yq}, \end{cases}$$
(3)

где  $\psi_a$ ,  $\psi_{fd}$ ,  $\psi_{yd}$ ,  $\psi_{yq}$  – потокосцепления статорной, возбуждения, продольной и поперечной демпферной обмоток;  $r_a$ ,  $r_{fd}$ ,  $r_{yd}$ ,  $r_{yq}$  – активные сопротивления обмоток; r – нелинейное сопротивление нагрузки (дугового канала); i,  $i_{fd}$ ,  $i_{yd}$ ,  $i_{yq}$  – токи, протекающие по обмоткам статора и ротора.

Параметры сопротивлений ударного генератора, выполненного в габаритах асинхронного двигателя МТН-612, приведены в табл. 1.

Решение системы уравнений (3) проведено численным методом последовательных интервалов, что позволило создать математическую модель работы ударного генератора на дугу в воде с изменяющимся межэлектродным промежутком. Работа ударного генератора на электрогидравлический излучатель с раздвигающимися электродами описывается рототабельным планом второго порядка типа 2<sup>3</sup>. Значение уровней переменных: длины подвижных электродов L, конечного значения длины дуги l, угла включения генератора α приведены в табл. 2.

Границы изменения длины подвижных электродов L, максимальной длины дуги l и угла включения  $\alpha$  охватывают оптимальный диапазон, полученный при проведении экспериментальных исследований. Кроме того, значение l=0,07 м при размещении электрогидравлического излучателя в скважине с водой ограничивается диаметром скважины, который не превышает 0,1-0,12 м.

Таблица 1.	Параметры сопротивлений ударного генератора
Table 1.	Parameters of resistance of a shock generator

Наименование Name	Обозначение Notation	Величина (Ом) Value (Ohm)
Активное сопротивление обмотки статора Active resistance of the stator winding	r <sub>a</sub>	0, 00187
Активное сопротивление обмотки возбуждения Field resistance	$r_{fd}$	0,0878
Активное сопротивление демпферной обмотки Quadrature axis amortisseur resistance	$r_{yd} = r_{yq}$	0,000076
Индуктивное сопротивление рассеяния статора Armature leakage reactance	$x_{\sigma^a}$	0,012
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения Field leakage reactance	$x_{\sigma f d}$	0,872
Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки Direct axis amortisseur reactance	$x_{\sigma Dd} = x_{\sigma Dq}$	0,00049
Индуктивное сопротивление взаимной индукции Direct axis armature reactance	$x_{ad} = x_{aq}$	0,12
Сверхпереходное индуктивное сопротивление Direct axis subtransient reactance	$x_d$	0,0121
Ударное индуктивное сопротивление Quadrature-axis subtransient impedance	$x_{yd}$	0,0249

Таблица 2. Значения уровней переменных

Table 2.Variable level values

Переменные Variables	Обозначение	Значение уровней переменных Value of the levels of variables							
	Notation	$-\phi$	-1	0	+1	$+\phi$			
<i>L</i> (м)	<i>x</i> <sub>1</sub>	0,1	0,14	0,18	0,22	0,26			
<i>l</i> (м)	$x_2$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07			
lpha (град)	$x_3$	0	20	40	60	80			

Матрица планирования и результаты расчётов выходных параметров: амплитуды тока дуги  $I_m$ , энергии дуги w, длительности горения дуги  $t_d$ , средней мощности дуги  $P_d = w/t_d$ , амплитуды импульса давления  $N_m$  представлены в табл. 3.

После исключения членов с незначимыми коэффициентами проведён анализ уравнений на адекватность с помощью критерия Фишера. Адекватные уравнения регрессии для значений выходных параметров имеют вид:

$$\begin{cases} I_m = 7,916 - 38, 6 \cdot L - 27, 8 \cdot l - \\ -0,00935 \cdot \alpha + 13, 5 \cdot l^2 - 0,005568 \cdot \alpha^2; \\ w = 10,32 - 23, 2 \cdot L + 16, 4 \cdot l - \\ -0,0413 \cdot \alpha - 0,00932 \cdot \alpha^2; \\ t_d = 9,12 - 16, 4 \cdot l - 0,00842 \cdot \alpha - 0,003348 \cdot \alpha^2; \\ N_m = 13,78 - 147 \cdot l - 0,0285 \cdot \alpha + \\ + 29 \cdot l^2 - 0,001 \cdot \alpha^2; \\ P_d = 1,13 - 1,93 \cdot L + 3,75 \cdot l - \\ -0,00368 \cdot \alpha - 0,000102 \cdot \alpha^2. \end{cases}$$
(4)

53

ro	r.	ro	ra	r, <sup>2</sup>	ro <sup>2</sup>	$r_{0}^{2}$	$x_{1} + x_{2}$	$x_1 \div x_2$	x2+x2	$I_m \cdot 10^3$	w·10 <sup>3</sup>	$t_d \cdot 10^{-3}$	$N_m$	$P_{d} \cdot 10^{6}$
~0	~1	~2	~3	~1	~2	~3				A/A	Дж/Ј	c/s	атм/atm	Bt/Wt
+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	9,05	12,82	9,68	17,35	1,324
+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	8,56	12,26	9,63	16,95	1,274
+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	8,5	12,87	9,4	13,81	1,37
+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	7,58	12,1	9,3	13,4	1,3
+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	7,53	7,12	8,72	13	0,816
+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	7,2	6,92	8,73	12,76	0,79
+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	7,6	7,64	8,53	10,72	0,896
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	6,83	7,43	8,53	10,75	0,895
+	$-\phi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	0	0	9,08	10,86	9,2	14,15	1,18
+	$+\phi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	0	0	7,34	9,87	9	13,55	1,097
+	0	$-\varphi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	0	8,97	9,67	9,47	17,71	1,027
+	0	$+\phi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	0	7,75	10,52	8,77	11,64	1,2
+	0	0	$-\phi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	8,16	12,94	9,6	15,28	1,348
+	0	0	$+\phi$	0	0	$\varphi^2$	0	0	0	6,04	4,42	7,6	9,3	0,582
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,91	10,28	9,1	13,78	1,13

 Таблица 3.
 Матрица планирования и результаты расчётов выходных параметров

 Table 3.
 Planning matrix and the results of calculations of output parameters

Система уравнений (4) представляет математическую модель работы ударного генератора на дугу в воде с изменяющимся межэлектродным промежутком.

Для проведения сейсморазведки определяющим параметром является максимальный импульс давления  $N_m$ , развиваемый электрогидравлическим излучателем. Исследования, проведённые на математической модели, показывают, что в данном случае амплитуда импульса давления  $N_m$  практически не зависит от длины подвижных электродов L, а определяется конечным значением длины дуги l и углом включения генератора  $\alpha$ .

На рис. 7 приведены графические зависимости амплитуды импульса давления  $N_m$  и средней мощности дуги  $P_d$  от угла включения при различных значениях длины дуги l.

Проведённые исследования показали, что наилучшими значениями независимых параметров являются: длина подвижных электродов L=0,1-0,26 м, конечное значение длины дуги *l*=0,07 м, угол включения ударного генератора  $\alpha=0^{\circ}$ . Максимальное значение развиваемого импульса давления N<sub>m</sub>=17,71 атм при средней мощности дуги P<sub>d</sub>=1,3 МВт. Из исследований, проведённых в [17], следует, что форма кривой импульса давления повторяет форму кривой тока дуги. С помощью осциллограммы тока на рис. 7 получена формула разложения импульса давления с амплитудой  $N_m = 17,71$  атм в ряд Фурье для постоянной составляющей и трёх значимых гармоник:

$$N_m(\omega t) = 5,64 + 8,85 \cdot \sin(\omega t) +$$

 $+3,76 \cdot \sin(2\omega t + 90^{\circ}) + 0,752 \cdot \sin(4\omega t + 90^{\circ}),$ 



**Рис. 7.** Зависимость амплитуды импульса давления  $N_m$  и средней мощности дуги  $P_d$  от угла включения  $\alpha$  при L=0,14 м для длин дуги l(m): 1) 0,07; 2) 0,06; 3) 0,05; 4)0,04; 5) 0,03





Рис. 8. Форма кривой импульса давления  $N_m(f)$  и амплитудно-частотный спектр импульса давления  $N_m(k)$ 

Fig. 8. Shape of the pressure pulse curve  $N_m(f)$  and amplitude-frequency spectrum of the pressure pulse  $N_m(k)$ 

здесь  $\omega$ =314 рад/с – угловая скорость вращения ротора ударного генератора.

На рис. 8 показана форма кривой импульса давления  $N_m(f)$  и его амплитудно-частотный спектр  $N_m(k)$ , где k – номер гармоники.

Анализ амплитудно-частотного спектра  $N_m(k)$  показывает, что основная энергия импульса давления лежит в среднечастотном диапазоне от 50 до 100 Гц, что обеспечивает высокий сейсмический КПД для проведения сейсморазведки.

### Выводы

- Ударный генератор, выполненный в габаритах кранового асинхронного двигателя МТН-612, имеет низкое напряжение статорной обмотки U=280 В, что делает его применение безопасным для малоглубинной сейсморазведки при работе в полевых условиях.
- Разработанная схема электрогидравлического излучателя с раздвигающимися электродами позволяет осуществлять инициирование электрической дуги без применения высоковольтного разряда конденсатора и взрывающихся проволочек, которые необходимо заменять после каждого взрыва.
- Электрогидравлический излучатель с раздвигающимися электродами может осуществлять работу в режиме одиночных импульсов, а также в режиме получения серии идентичных импульсов с заданной частотой следования, что позволяет рекомендовать его применение в

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1986. – 252 с.
- Numerical and experimental study on electrohydraulic forming process / Min-A Woo, Hong-Kyo Kim, Hyeong-Gyu Park, Yong-Hee Kim, Woo-Jin Song, Jeong Kim // Procedia Engineering. – 2017. – V. 207 – P. 311–316.

электрогидравлических технологиях для электрогидравлической очистки скважин, штамповки, очистки литья и т. д.

- Проведённые исследования с помощью математической модели работы ударного генератора на электрогидравлический излучатель с подвижными электродами показали, что наилучшими значениями независимых параметров являются: длина подвижных электродов L=0,1-0,26 м, конечное значение длины дуги l=0,07 м, угол включения ударного генератора α=0°. Максимальное значение развиваемого импульса давления N<sub>m</sub>=17,71 атм при средней мощности дуги N<sub>m</sub>=17,71 атм позволяет рекомендовать применение данного устройства в малоглубинной сейсморазведке на глубину до 1 км.
- 5. Из анализа амплитудно-частотного спектра следует, что основная энергия импульса давления лежит в среднечастотном диапазоне от 50 до 100 Гц, следовательно, предлагаемое устройство имеет высокий сейсмический КПД для проведения сейсморазведки.
- 6. Недостатком электрогидравлического излучателя с раздвигающимися электродами является эрозия контактов при горении дуги. Эта проблема может быть решена путём периодической замены контактов подвижных электродов, а также подбором тугоплавких материалов, увеличивающих срок службы контактов, что требует проведения дополнительных исследований.
- Majid Ziaa, Ali Fazlia, Mahdi Soltanpoura. Warm Electrohydraulic Forming: a Novel High Speed Forming Process // Procedia Engineering. – 2017. – V. 207 – P. 323–328.
- The research on the pulsed arc electrohydraulic discharge and its application in treatment of the ballast water / Lu Zhu, Zheng-Hao He, Pei Li, Tai-Sheng Xu, Zhi-Wen Gao // Journal of Electrostatics. - 2013. - V. 71. - Iss. 4. - P. 728-733.

- Research on the influence of conductivity to pulsed arc electrohydraulic discharge in water / Lu Zhu, Zheng-Hao He, Zhi-Wen Gao, Fa-Li Tan, Jen-Shih Chang // Journal of Electrostatics. - 2014. - V. 72. - Iss. 1. - P. 53-58.
- Electrohydraulic shock wave generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar / O. Maurelb, T. Reessa, M. Matallahc, A. de Ferrona, W. Chenb, C. la Borderieb, G. Pijaudier-Cabotd, A. Jacquese, F. Rey-Bethbedere // Cement and Concrete Research. - 2010. - V. 40. - Iss. 12. - P. 1631-1638.
- Mathematical description of an asynchronous motor with the indirect control of the output mechanical variables / A.V. Glazachev, Yu.N. Dementyev, K.N. Negodin, A. Umursakova // European Physical Journal Web of Conferences (EPJ Web of Conferences). – 23 February, 2016. – V. 110. Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 01044, 6 p. URL: http://dx.doi.org/ 10.1051/epjconf/201611001044 (дата обращения 15.10.2018).
- Bolgov I.S., Dementiev Y.N. High-precision former of velocity and motor shaft position angle codes // Control and Communications (SIBCON): Proc. of the XII International Siberian Conference. – Moscow, 12–14 May, 2016. URL: http://dx.doi.org/ 10.1109/SIBCON.2016.7491762 (дата обращения 15.10.2018).
- Denstedt J.D., Clayman R.V. Electrohydraulic Lithotripsy of Renal and Ureteral Calculi // The Journal of Urology. - 1990. -V. 143. - Iss. 1. - P. 13-17.
- 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.
- Окунь И.З. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде // Журн. технической физики. 1971. – Т. 41. – № 2. – С. 292–300.
- Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Ч. 1. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 203 с.

- Мирзоян Ю.Д. Источники упругой энергии и возбуждение сейсмических волн при наблюдениях ВСП на море // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2000. – № 9. – С. 22–28.
- Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / под ред. А.В. Калинина. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 193 с.
- 15. 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.
- 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 электромашинного генератора для сейсморазведки // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 82–86.
- Pustynnikov S.V., Popov V.I., Khor'kov K.A. Mathematical model of the operation of an impact generator in an electrohydraulic device // Soviet surface engineering and applied electrochemistry. – 1989. – V. 6. – P. 57–62. URL: https://www.scopus.com/ inward/authorDetails.uri?authorID=6508138409&partnerID=5ESL7QZV&md5=d4d359b34614 b97e4980df15abc5797c (дата обращения 15.10.2018).
- Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с.
- Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 496 с.
- 21. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Изд-во «Юрайт», 2017. 767 с.

Поступила 22.10.2018 г.

# Информация об авторах

*Пустынников С.В.*, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Носов Г.В.*, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Хан Вей*, кандидат технических наук, профессор Института физики, заместитель директора международного центра «Наука будущего» Цзилиньского университета.

*Носова М.Г.*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экономической математики, информатики и статистики факультета вычислительных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. UDC 550.834; 621.373

# INVESTIGATION OF OPERATION OF A LOW VOLTAGE SHOCK GENERATOR IN AN ELECTROHYDRAULIC DEVICE FOR SEISMIC EXPLORATION AT SMALL DEPTH

# Sergey V. Pustynnikov<sup>1</sup>,

pustynnikov@tpu.ru

# Gennady V. Nosov<sup>1</sup>,

nosov@tpu.ru

Wei Han<sup>2</sup>, whan@jlu.edu.cn

### Mariya G. Nosova<sup>3</sup>,

nosovamgm@gmail.com

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> Jilin University, Qianin Street 2699, Changchun, 130012, P.R. China.
- <sup>3</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop new sources of powerful current pulses for operation in an electrohydraulic device with moving electrodes that can be used to excite seismic waves in non-explosive seismic surveys.

**The aim** of the research is to carry out computational and experimental studies of operation of a low-voltage shock generator on an arc in water, initiated by moving electrodes in the mode of single pulses and in production of a series of pressure pulses. Optimization of the parameters of the shock generator and the electrohydraulic radiator, in order to obtain the maximum pressure pulse.

**Objects:** low-voltage shock generator, made in the dimensions of the crane asynchronous motor MTH-612, connected to an electrohyd-raulic source with moving electrodes.

**Methods:** matching parameters of a shock generator and an arc discharge by the method of experiment planning using a mathematical model.

**Results.** The authors have carried out the laboratory studies of operation of a low-voltage shock generator on an arc in water initiated by moving electrodes in the regime of single pulses and in the generation of a series of pulses. Using the method of experiment planning, the authors obtained the mathematical model of the shock generator operation on an arc in water, initiated by moving electrodes in the regime of single pulses; the regression equations are obtained for output parameters of the arc discharge. Optimization of the parameters of the shock generator and the electrohydraulic source was carried out, which allows obtaining the maximum pressure pulse for seismic exploration at shallow depth. The obtained amplitude-frequency spectrum of the pressure pulse showed that the main energy of the pressure pulse lies in the low-frequency range from 0 to 180 Hz, which provides a high seismic efficiency for seismic exploration at shallow depth.

### Key words:

Shock generator, electrohydraulic source, moving electrodes, mathematical model, oscillogram, seismic survey.

#### REFERENCES

- 1. Yutkin L.A. *Elektrogidravlichesky effekt i ego primenenie v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 252 p.
- Min-A Woo, Hong-Kyo Kim, Hyeong-Gyu Park, Yong-Hee Kim, Woo-Jin Song, Jeong Kim. Numerical and experimental study on electrohydraulic forming process. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 207, pp. 311–316.
- Majid Ziaa, Ali Fazlia, Mahdi Soltanpoura. Warm Electrohydraulic Forming: a Novel High Speed Forming Process. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 207, pp. 323–328.
- Lu Zhu, Zheng-Hao He, Pei Li, Tai-Sheng Xu, Zhi-Wen Gao. The research on the pulsed arc electrohydraulic discharge and its application in treatment of the ballast water. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, Iss. 4, pp. 728–733.
- 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, Iss. 1, pp. 53-58.

- Maurelb O., Reessa T., Matallahc M., De Ferrona A., Chenb W., La Borderieb C., Pijaudier-Cabotd G., Jacquese A., Rey-Bethbedere F. Electrohydraulic shock wave generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, Iss. 12, pp. 1631–1638.
- Glazachev A.V., Dementyev Yu.N., Negodin K.N., Umursakova A. Mathematical description of an asynchronous motor with the indirect control of the output mechanical variables. *European Physical Journal Web of Conferences (EPJ Web of Conferences)*.
   23 February, 2016. Vol. 110. Thermophysical Basis of Energy Technologies. 01044, 6 p. Available at: http:// dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001044 (accessed 15 October 2018).
- Bolgov I.S., Dementiev Y.N. High-precision former of velocity and motor shaft position angle codes. Control and Communications (SIBCON): Proc. of the XII International Siberian Conference. Moscow, 12-14 May, 2016. Available at: http:// dx.doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491762 (accessed 15 October 2018).

- Denstedt J.D., Clayman R.V. Electrohydraulic Lithotripsy of Renal and Ureteral Calculi. *The Journal of Urology*, 1990, vol. 143, Iss. 1, pp. 13–17.
- 10. 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.
- 11. Okun I.Z. Issledovanie voln szhatiya, voznikayushchikh pri impulsnom razryade v vode [Investigation of compression waves arising during pulsed discharge in water]. *Zhurnal tehhnitheskoy fiziki*, 1971, vol. 41, no. 2, pp. 292–300.
- Chmelevskiy V.K. Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoy kory [Geophysical methods of investigation of the earth's crust]. Dubna, International University of Nature, Society and Man «Dubna» Publ., 1999. P. 1, 203 p.
- Мігzонап Yu.D. Istochniki uprogoy energii i vozbuzhdenie seysmicheskikh voln pri nablyudeniyakh VSP na more [Sources of elastic energy and excitation of seismic waves during observations of VSP at sea]. Geologija, geofizika i razrabotka neftjanykh i gazovykh mestorozhdeniy, 2000, no. 9, pp. 22–28.
- Kalinin A.V. Elektroiskrovoy istochnik uprugikh voln dlya tseley nazemnoy seyismorazvedki [The spark source of elastic waves for land seismic works]. Moscow, MGU Publ., 1989. 193 p.
- 15. Sipaylov G.A., Khorkov K.A., Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. O primenenii electrisheskich mashin dlya elektrogidra-

vlicheskogo metoda seysmorazvedki [On application of electrical machines for electrohydraulic seismic survey method]. *Silovye impulsnye sistemy* [Power impulse systems]. Novosibirsk, Institute of mining, SOAN SSSR Publ., 2008. pp. 66–70.

- Frankovskiy D.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.
- 18. Pustynnikov S.V., Popov V.I., Khor'kov K.A. Mathematical model of the operation of an impact generator in an electrohydraulic device. Soviet surface engineering and applied electrochemistry, 1989, vol. 6, pp. 57–62. Available at: https://www.scopus.com/inward/authorDetails.uri?authorID=6508138409& partnerID=5ESL7QZV&md5=d4d359b34614b97e 4980df15abc5797c (accessed 15 October 2018).
- Krivizkiji E.V., Chamko V.V. Perekhodnye protsessy pri vysokovoltnom razryade v vode [Transient processes in high-voltage discharge in water]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979. 208 p.
- Sindyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh [Theory of experimental planning and analysis of statistical data]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 496 p.
- 21. Kopylov I.P. *Proektirovanie electricheskikh machin* [Designing electrical machines]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 767 p.

Received: 22 October 2018.

### Information about the authors

Sergey V. Pustynnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Gennady V. Nosov, 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.

Mariya G. Nosova, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 621.644.029

# ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ СПЕЦИАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СПЕКТРОВ ВИБРОСКОРОСТИ

Байков Игорь Равильевич<sup>1</sup>,

pte@rusoil.net

# Смородова Ольга Викторовна<sup>1</sup>,

olga smorodova@mail.ru

# Китаев Сергей Владимирович<sup>1</sup>,

svkitaev@mail.ru

# Шаммазов Айрат Мингазович<sup>1</sup>,

pte@rusoil.net

1 Уфимский государственный нефтяной технический университет,

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки дополнительных методов оценкитехнического состояния газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов. Аварийные ситуации на компрессорных станцияхвлекут за собой последствия глобального характера для материальной базы и окружающей среды. Основным направлением обеспечения безаварийной работы компрессорных станций является поддержка технического состояния газоперекачивающих агрегатов на требуемом уровне.

**Цель:** разработка метода оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов интерпретацией виброспектра колебаний корпуса подшипника турбины низкого давления агрегата с формулировкой заключения «есть дефект/нет дефекта».

**Объекты:** газоперекачивающие агрегаты ГТК-10, эксплуатируемые в ПАО «Газпром». Агрегаты данного типа обеспечиваютболее 8 ГВт установленной мощности, что составляет более 20 % в газотранспортной системе страны. Базой данных для проведения исследований является система данных результатов вибродиагностики агрегатов за 4 года.

**Методы.** Для повышения достоверности интерпретации спектров колебаний подшипниковых узловпредлагается использовать метод построения разделяющей поверхности в 340-мерном фазовом пространстве по характеристикам обучающей выборки виброспектров. Установлено, что достоверность определения состояния агрегата при этом связана прямо пропорционально с количеством спектров в обучающей выборке, сформированной на основе информации по вибрационным обследованиям. Максимальная адекватность выводов при идентификации состояния агрегатов имеет место при описании вибросигнала преобразованием Фурье с ярко выраженными амплитудами виброскорости.

**Результаты.** Построена гиперплоскость для определения уровнятехнического состояния газовых турбинкомпрессорных станций ПАО «Газпром» интерпретацией спектров виброобследования. Учитывая уменьшение обучающей выборки при отсеивании части спектров, наиболее препятствующих реализации алгоритма, ошибка при распознавании текущего вибросигнала агрегата прогнозируется в пределах 15–30 %.

#### Ключевые слова:

Обучающая выборка, виброскорость, разделяющая поверхность, размерность, алгоритм, таксон.

### Введение

Стратегические планы газовой промышленности, во многом определяющей техногенное развитие страны, определяются состоянием и условиями эксплуатации перекачивающего оборудования магистральных газопроводов [1]. В связи с этим разработка способов достоверного диагностирования технического состояния агрегатов [2] характеризуется не снижающимся интересом как для дочерних предприятий, так и для всей газотранспортной системы [3].Одной из причин повышенного внимания к диагностике вообще и вибродиагностике в частности [4, 5] является требование сохранения работоспособности газоперекачивающего оборудования при развитии процесса старения и деградации.

Общепринятый подход к идентификации состояния газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с помощью виброспектров колебаний зачастую не позволяет адекватно оценить техническое состояние агрегатов [6]. При этом основным препятствием является неоднозначность спектральной картины развития дефектных разрушений [7]. Для повышения достоверности интерпретации спектра виброскорости в статье предлагается алгоритм, разработанныйс использованием концепции распознавания образов [8].

# Интерпретация виброспектров методами теории распознавания образов

В традиционной постановке задача распознавания образов сводится к идентификации типа объекта по его качественным или количественным признакам [9]. В таких задачах предполагается, что для настройки алгоритма имеется обучающая выборка [10], то есть некоторая совокупность спектров виброскорости, классификация которых достоверно априори известна («исправный/дефектный»). При этом для достоверной классификации рабочего виброспектра обучение алгоритма должно быть реализовано обучающей выборкой, достоверно интерпретирующей состояние агрегата в условиях, идентичных условиям текущей эксплуатации оборудования [11]. Принимая во внимание незначительную аварийность газоперекачивающих агрегатов, естественным образом встает вопрос минимального объема обучающей выборки. Достаточно частым случаем является ситуация, когда объем обучающей выборки значительно меньше количества диагностических признаков. В этом случае процедура построения линейного решающего правила [12] является оптимальным решением.

К признакам тестирования частотных рядов амплитуд виброскорости предъявляется ряд требований:

- простота их экспериментальногоконтроля;
- доступность и несложностьколичественной оценки;
- взаимнаянезависимость [13].

Кроме того, повышение достоверности процедуры реализации алгоритма достигается наращиванием базы определяющих признаков [14].

При подготовке к реализации процедуры оценки технического состояния ГПА в качестве определяющих критериевбыла рассмотрена совокупность различных параметров виброспектров колебаний подшипниковых узлов турбин низкого давления ГПА:

- частотный ряд амплитуд виброскорости;
- амплитуды виброскорости на кратных частотах спектра при узкополосном частотном анализе;
- СКЗ виброскорости по всему спектру и по частотным полосам;
- спектральная плотность по всему спектру и в частотных диапазонахпредполагаемых дефектов ГПА.

Для отбора наиболее информативных показателей был определен уровень значимости каждого из них [15]. В результате в качестве оптимального признака диагностирования технического состояния агрегатов определен частотный ряд 340 амплитуд виброскорости колебаний опорно-упорного подшипника агрегата [16].

Такой подход отображает каждый виброспектр из 340 амплитуд частотного ряда в системе координат 340-мерного пространства отдельной точкой [17]. Оптимальное формирование базы признаков интерпретации вибрспектров приводит к дифференциации совокупностей образов «исправных/дефектных» агрегатов в 340-мерной системе координат [18]. Полученные таксоны могут быть разделены в пространстве геометрически, аналитический образ разделяющей геометрической формы может быть установлен в рамках итерационного процесса [19].

После формирования базы показателей интерпретации виброспектров не менее важным моментом является подбор элементов обучающей выборки. В нее должны войти спектры, зарегистрированные при однозначно дефектном и однозначно исправном состоянии ГПА (группа 2 и группа 1 соответственно). Опыт эксплуатации и ремонта ГПА газотранспортной системы показывает, что для многих агрегатов (в частности, ГТК-10) максимальное развитие дефекта в роторной конструкции достигается за период не более 1 месяца. Продолжение эксплуатации оборудования при этом приводит либо к аварийному отказу, либо агрегат выводится в ремонт [19].

Таким образом, при анализе ретроспективной базы данных вибродиагностики агрегатов марки ГТК-10 были использованы следующие временные диапазоны дифференциации:

- группа 1 регистрация спектра более 2 месяцев до аварии;
- группа 2 регистрация спектра менее 1 месяца до аварии.

В результате временного анализа базы данных вибродиагностики была сформирована обучающая выборка виброспектров. По каждому направлению возможных колебаний – вертикальному, горизонтальному, осевому – длина обучающей выборки составила около 35 спектральных сигналов. Таким образом, при значительном, практически десятикратном отличии размерности диагностических признаков от количества спектров в обучающей выборке оптимальным считается разделение таксонов групп спектров посредством гиперплоскости [8].

Задача состоит в идентификации такого направления  $\psi_0$  в 340-мерном пространстве признаков, чтобы расстояние между проекциями таксонов 1 и 2 группы на это направление было максимальным. Линия геометрического разделения оболочек таксонов формируется по нормали к направлению  $\psi_0$ , через центральную точку отрезка между областями спектров заведомо дефектного и заведомо исправного состояния ГПА (рис. 1). Априори полагают, что длина отрезка между таксонами вдоль оси  $\psi_0$  превышает предложенный параметр  $\rho$ .



- **Рис. 1.** Таксоны компонентов в процессе обучения алгоритма в виде проекции 340-мерного пространства амплитуд виброскорости
- Fig. 1. Taxons of components in algorithm learning in the form of a projection of the 340-dimensional space of vibration velocity amplitudes

Процедура построения геометрической поверхности раздела таксонов предваряется отсевом спектров виброскорости по аналогии с грубыми погрешностями измерений. Показателем необходимости отсева какого-либо спектра является его препятствие четкому разделению групп спектров. Необходимо учитывать, что уменьшение объема обучающей выборки за счет отсеивания части ее элементов приводит к снижению достоверности тестирования рабочих спектров в будущем на основе положения их в фазовом пространстве в виде точки относительно построенной разделяющей плоскости.

Следует подчеркнуть, что именно качество обучающей выборки и ее объем определяют уровень достоверности заключения о механическом состоянии агрегата по результатам вибрационной диагностики ГПА [20]. Последовательность действий при построении разделяющей плоскости между таксонами облучающей выборки представляет собой следующий ряд.

Для наполнения обучающей выборки были подобраны вибросигналы за последние 4 года эксплуатации газоперекачивающих агрегатов в однозначно исправном и однозначно предаварийном состоянии:

- 120 сигналов колебаний подшипниковых узлов турбины низкого давления в горизонтальном, вертикальном и осевом направлениях колебаний (отсутствие дефекта);
- 50 сигналов колебаний подшипниковых узлов турбины низкого давления в горизонтальном, вертикальном и осевом направлениях колебаний (предаварийное состояние).

Максимальная частота в спектрах составляла 400 Гц с частотой дискретизации на уровне 1,15 Гц.

Примем обозначения:  $B_i$  (*i*=1...40) – для спектров однозначно исправного состояния агрегатов;  $B_j$  (*j*=1...10) – для спектров в предаварийном состоянии агрегатов.

Каждому спектру в этих группах соответствует точка в 340-мерном пространстве диагностических признаков, которыми являются амплитуды частотных рядов Фурье-разложения вибросигнала. Для обоснованного сопоставления амплитуд разных спектров на одной частоте (рис. 2, *a*) было проведено намеренное выравнивание их уровней значимости нормированием:

$$A_{km} = \frac{B_k - \min B_m}{\max B_m - \min B_m} \times 255,$$

где  $\min(\max)B_m = \min(\max)(B_{mi}, B_{mj})$  – наименьшее (наибольшее) значение виброскорости при (*m*) Гц по двум таксонам элементов; 255 – нормирующий множитель для обеспечения наибольшей точности при оцифровке вибросигналов диагностической базы.

Спектр вибрации, получаемый в результате данной нормировки, представлен на рис. 2, б.

В результате обработки диагностической базы данных было установлено, что на любой частоте спектра с одинаковой вероятностью может иметь место амплитуда сигналапроизвольной величины в интервале (0; +1). Это позволяет обеспечить равный уровень значимости для каждой частоты виброспектра.

В соответствии с поставленной задачей, процедура обучения алгоритма сводится к нахождению аналитического уравнения плоскости

$$\sum_{m=1}^{340} \alpha_m A_m = 0,$$

которая позволит дифференцировать таксоны группы 1 и группы 2 так, что интегральное расстояние от плоскости до каждого элементатаксонов будет наибольшим из всех возможных.

На нулевой итерации (k=0) принимают все компоненты вектора  $\alpha_m$  предельно малыми, незначительно больше нуля–  $\alpha_m=0,001$ . Последующая реализации алгоритма показала состоятельность такого задания компонентов для нахождения аналитического уравнения гиперплоскости.



Рис. 2. Нормирование спектра виброскорости по величине амплитуды

Fig. 2. Normalization of vibration velocity spectrum by the amplitude magnitude

Компоненты вектора разделяющей плоскости  $\psi_0$  были определены как разность между расстояниями каждого элемента группы 1 и группы 2 до нее соответственно [9]:

$$\psi_m^k = \sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^{10} \alpha_m^k (A_{im} - \overline{A}_{jm}).$$

Для компонентов направляющего вектора  $\alpha_m$  в первой итерации будет справедливо соотношение

$$\alpha_{m}^{1} = \alpha_{m}^{0} + h \frac{\psi_{m}^{0}}{\sqrt{\sum_{m=1}^{340} (\alpha_{m}^{0})^{2}}},$$

где постоянная h принимается из условия обеспечения относительно малого приращения компонентов  $\alpha_m^0$ .

Закономерной при практической реализации алгоритма является оценка достаточного для дифференциации таксонов спектров обучающей выборки количества итераций. Специфика процедуры такова, что при увеличении количества итераций наиболее значимые частоты спектров по уровню значимости все более доминируют над остальными. При малом количестве итераций – после первой итерации (рис. 3, a) – структура спектра меняется незначительно и практически соответствует началу процесса (рис. 2,  $\delta$ ). Уже после третьей итерации (рис. 3,  $\delta$ ) значимость диапазона в окрестности частоты первой роторной гармоники становится критически преобладающей.

Одновременно практически все амплитуды виброскорости в остальной части спектра были сглажены, и, следовательно, информация обо всех остальных структурных особенностях спектра утеряна. В результате авторами в качестве оптимальной была выбрана процедура оценки коэффициентов  $\alpha_m$  разделяющей гиперплоскости в последовательности трех шагов.

Для диагностирования текущего механического состояния газоперекачивающих агрегатов по результатам виброобследования рекомендуется



Fig. 3. Significance level of the spectrum frequencies

определять расстояние от соответствующей точки в 340-мерном пространстве амплитуд виброскорости до разделяющей плоскости по формуле:

$$L = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{340} \alpha_m A_m}}{\sqrt{\sum_{m=1}^{340} \alpha_m^z}}$$

#### Результаты интерпретации спектров виброскорости

По результатам вибрационного обследования газоперекачивающих агрегатов было проведено обучение алгоритма, построение разделяющей гиперплоскости и установлено положение точек таксонов (группа 1 и группа 2) относительно построенной плоскости в двумерном пространстве (рис. 4).

Двумерная проекция идентифицированной разделяющей плоской поверхностипоказана сплошной линией на рис. 4. По оси ординат отложены координаты тестируемого спектра в двумерной системе координат, соответствующей проекции всей системы в 340-мерном пространстве. Как правило, спектры предаварийного и исправного оборудования не удается полностью разделить – именно эта ситуация и представлена на рис. 4.

При формировании заключения о достоверности дифференциации тестируемого спектра, необходимо формулировать и количественные показатели адекватности. Примем нормальный закон распределения элементов внутри каждого таксона. Тогда вероятность того, что спектр принадлежит к группе аварийных, составит [9] вероятность одновременного наступления двух событий: спектр принадлежит к аварийным, и спектр не принадлежит к исправным:

$$P = P_{\rm ab} \left( 1 - P_{\rm HCII} \right),$$

где  $P_{\rm ab}$  – вероятность предаварийного состояния агрегата;  $P_{\rm нсп}$  – вероятность бездефектного состояния агрегата.



 $\delta$  – третья итерация/third iteration



Рис. 4. «Исправные/дефектные» спектры виброскорости таксонов

Fig. 4. «Serviceable/defective» vibration spectra of taxons

Уравнение получено как оценка вероятности одновременного наступления двух независимых событий:

- состояние агрегата предаварийное;
- состояние агрегата небездефектное.

Статистические исследования показателей распределения спектров в каждом таксоне показали, что адекватностьвыводов о механическом состоянии агрегатаопределяется дисперсией и математическим ожиданием распределения спектров в кажлом таксоне – минимальное значение дисперсии определяет максимальное значение достоверности заключения. При необходимости дисперсия может быть уменьшена последовательным удалением спектров, по образу отсева грубых погрешностей при анализе результатов эксперимента. Однако при этом неизбежно наступает и снижение достоверности дифференциации таксонов на такую же величину. Поэтому для сохранения достоверности результатов интерпретации спектров рекомендуется удалять лишь некоторое количество отдельных значительно выпавших из таксона точек.

Для оценки качества построенной разделяющей плоскости рекомендуется процедура «скользящий контроль» для расчета вероятности неправильного определения технического состояния агрегата интерпретациейвибросигнала [8].

При компоновке обучающей выборки в ее состав были включены спектры базы данных вибродиагностики, в том числе и максимально близкие к границе раздела таксонов. Такие спектры в дальнейшем и препятствовали однозначному разделению таксонов (рис. 4) и при обучении алгоритма в дальнейшем были исключены из обучающей выборки. По результатам исключения части элементов определяется вероятность ошибочной классификации текущего вибросигнала. Этот показатель рассчитывается по формуле (таблица) и является критерием качества идентифицированной разделяющей гиперплоскости:

$$P = \frac{m}{l} + \frac{r_{\text{om}}}{l - m},$$

где m – количество спектров, удаленных при обучении алгоритма; l – первоначальное количество спектров в обучающей выборке сигналов;  $r_{\rm om}$  – количество неправильно интерпретированных спектров при процедуре «скользящий контроль».

- **Таблица.** Определение качества построенной разделяющей поверхности
- Table.
   Determination of the constructed separating surface quality

1										
	Пo By	ающей trainin	выбор g samp	ке ole	При «скользящем контроле» By the «sliding control»					
Группыспектров Spectra group	Количество векторов Number of vectors	Правильно распознано	Correctly recognized	Ошибочно распознано	Incorrectly recognized	Количество векторов Number of vectors	Правильно распознано	Correctly recognized	Эшибочно распознано Incorrectly recognized	
	ед./units (%)		(%)	ед. units	(%)	ед./un	its	(%)	ед. units	(%)
1	26	26	100,0	0	100,0	26	24	92,3	2	7,7
2	19	19	100,0	0	100,0	19	14	73,8	5	26,2
3	45	45	100,0	0	100,0	45	38	84,4	7	15,5

Принимая во внимание количество элементов, удаленных на стадии обучения алгоритма, вероятность ошибки при оценке механического состояния агрегата по колебаниям корпусов подшипниковых узлов составила 15–30 %.

Рассмотренный способ был использован для оценки технического состояния газоперекачивающего оборудования марки ГТК-10. Было установлено, что построение разделяющей геометрической поверхности между таксонами вибросигналов подшипников агрегатов в исправном и предаварийном состоянии могло идентифицировать около 60 % развития дефектов, вызвавших аварийные отказы за четыре года эксплуатации в ПАО «Газпром», не установленные другими способами.

Многократная реализация алгоритма по обработке виброспектров базы данных виброобследований за несколько лет показала, что наиболее высокая достоверность идентификации класса спектра вибрации достигается при наличии равномерного уровня значимости частот в спектрах виброскорости. Затруднение в классификации вибросигналов вызывает, как правило, широкополосный шум [21].

### Заключение

Для определения механического состояния роторного газотранспортного оборудования интерпретацией виброспектров колебаний подшипниковых узлов турбины низкого давления ГПА рекомендован способ дифференциации таксонов спектров разных состояний плоской поверхностью. Показано, что ошибка интерпретации вёибросигнала уменьшается с ростом объема обучающей выборки, сформированной на основе баз данных виброобследований. Разработка аналитического образа

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базаров А.А., Данилушкин А.И. Моделирование тепловых и гидравлических процессов в магистральном газопроводе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 81–90.
- Байков И.Р., Смородова О.В., Китаев С.В. Оценка параметров надежности агрегатов перекачки магистрального газа // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2017. – № 1. – С. 95–107. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1\_2017/ ogbus\_1\_2017\_p95–107\_BaikovIR\_ru.pdf (дата обращения 30.03.2017).
- Improvement of the composition of detergent solutions for the removal of deposits on the axial-compressor blades of gas-turbine units / I.R. Baikov, A.M. Suleimanov, M.I. Kuznetsova, S.V. Kitaev, Yu.V. Kolotilov // Polymer Science. Series D. 2018. V. 11. № 1. P. 82-85.
- Шварц А.Ю., Антропов П.Г., Долинина О.Н. Интеллектуальная система диагностики газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций // Новые технологии в газовой промышленности. – Саратов, 16 декабря 2016. – С. 135–145.
- Байков И.Р., Смородова О.В., Смородов Е.А. Применение ранговых критериев для вибродиагностики ГПА // Газовая промышленность. – 2000. – № 1. – С. 42–44.
- Иванов Э.С., Гольянов А.И. Совершенствование процессов эксплуатации газоперекачивающих агрегатов // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 1. – С. 42–48.
- Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. – Пермь: Изд-во «Вибро-Центр», 2012. – 202 с.
- Vapnik V.N., Chervonenkis A.Y. On the uniform convergence of relative frequencies of events to their probabilities // Measures of Complexity: Festschrift for Alexey Chervonenkis. – New York: Springer International Publ., 2015. – P. 11–30.
- 9. Chervonenkis A.Y. Problems of machine learning // Lecture Notes in Computer Science. 2011. V.6744 LNCS. P. 21–23.
- Vetter T., Poggio T. Linear Object Classes and Image Synthesis from a Single Example Image // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – V. 19. – P. 733–742.

поверхности разделения таксонов обучающей выборки обеспечивает адекватную оценку состояния ГПА как «исправное/предаварийное» на уровне 60 %.

На уровень ошибки классификации спектра виброскорости существенное влияние оказывает временной период развития дефекта агрегата. При развитии дефекта до практически предаварийного состояния достоверность заключения по алгоритму разработанного метода повышается. Снижение адекватности заключения происходит в том случае, когда дефект находится на ранней стадии развития. Подобные результаты имеют место и в случае одновременного развития нескольких дефектов с совмещением спектральных образов. Этот факт обуславливает наличие безошибочно интерпретированных виброспектров на уровне не более 60 %.

- Dai Y., Nakano Y. Recognition of facial images with low resolution using a Hopfield memory model // Pattern Recognition. -1998. - V. 31. - P. 159-167.
- Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Изд-во «Мир», 1973. – 957 с.
- Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal «Services Sciences». - 2008. - V. 1. -№ 1. - P. 83-98.
- Figueira J., Greco S., Ehrgott M. Multiple Criteria Decision Analysis // State of the Art Surveys. New York: Springer, 2016. P. 27–38.
- 15. Foresti G.L. Outdoor Scene Classification by a Neural Tree-Based Approach // Pattern Analysis and Applications. 1999. V. 2.  $N_2$  2. P. 129–142.
- Temple T.W., Fokz F.L., Jamalallail H.R. System monitors gasturbine maintenance // Oil and Gas Journal. - 1980. - V. 78. -№ 38. - P. 105-113.
- Machine learning classification with confidence: application of transductive conformal predictors to MRI-based diagnostic and prognostic markers in depression / I. Nouretdinov, S.G. Costafreda, A. Gammerman, A. Chervonenkis, V. Vovk, V. Vapnik // NeuroImage. – 2011. – V. 56 (2). – P. 809–813.
- Smorodov E., Deev V. Application of Serial Statistics for Diagnostics of the Oil and Gas Equipment // Journal of Fushun petroleum Institute. - 2000. - № 4. - P. 52-57.
- Китаев С.В., Иванов Э.С., Галикеев А.Р. Повышение энергоэффективности режимов работы технологического оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов. – СПб: Недра, 2016. – 200 с.
- Bakowski K., Bakowski P. Systemy ochronne w stacjach redukcji gazu // Gaz, Woda i Technika Sanitaria. – 1996. – № 5. – P. 167–179.
- Байков И.Р., Смородов Е.А., Смородова О.В. Генерация сверхнизких частот при работе газоперекачивающих агрегатов и их влияние на спектр вибрации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 4. – С. 62–67.

Поступила 29.05.2018 г.

## Информация об авторах

*Байков И.Р.*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

*Смородова О.В.*, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

*Китаев С.В.*, доктор технических наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Шаммазов А.М., доктор технических наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа Факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 621.644.029

# SPECIAL METHODS FOR INTERPRETING THE SPEED VIBRATION SPECTRUM FOR DIAGNOSTIC OF GAS-PUMPING UNIT STATE

# Igor R. Baykov<sup>1</sup>,

pte@rusoil.net

# Olga V. Smorodova<sup>1</sup>,

olga smorodova@mail.ru

# Sergei V. Kitaev<sup>1</sup>,

svkitaev@mail.ru

### Airat M. Shammazov<sup>1</sup>,

pte@rusoil.net

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,

1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop additional methods for assessing the technical state of gas-pumping units of the main gas pipelines compressor stations. Emergency situations entail consequences of a global nature for the material base and the surrounding environment. The main direction of maintenance of trouble-free compressor stations operation is the maintenance of the technical state of gas-pumping units at the required level.

**The main aim** of the research is to develop a method for assessing the technical state of gas-pumping units by interpreting the vibration spectrum of oscillations of the bearing housing of the low-pressure turbine of the unit with the formulation of the conclusion «there is a defect/there is no defect».

**The objects** of research are GTK-10 gas-pumping units operated by PJSC Gazprom. Units of this type provide more than 8 GWt of installed capacity, which is more than 20 % in the country's gas-pumping system. The database for the research is the data of the results of vibration units diagnostics for 4 years.

**Methods.** To assess the technical state of gas-pumping units based on the interpretation of the vibro-survey spectrum, it is proposed to use the method of constructing a separating surface in a 340-dimensional phase space according to the characteristics of a training sample of vibrospectra. It is established that the reliability of the classification of the spectrum rises with increasing the training sample volume, formed a priori. The greatest effect can be achieved if there are separate strongly marked harmonics in the spectrum.

**Results.** The authors have constructed a hyperplane to diagnose the technical condition of gas-pumping units of compressor stations of PJSC «Gazprom» by interpreting the spectra of vibration analysis. Taking into account the number of spectra excluded by the separating surface, the probability of erroneous classification of the working vibro-spectra of a gas-pumping unit is set in the range of 0,15–0,30.

### Key words:

Training sample, vibration velocity, separating surface, dimension, algorithm, taxon.

### REFERENCES

- Bazarov A.A., Danilushkin A.I. Modeling of thermal and hydraulic processes in the main gas pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 81–90. In Rus.
- Baikov I.R., Smorodova O.V., Kitaev S.V. Estimation of reliability parameters of aggregates of pumping of the main gas. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2017, no. 1, pp. 95–107. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/issues/1\_2017/ogbus\_1\_2017\_p95–107\_BaikovIR\_en.pdf (accessed 30 March 2017).
- Baikov I.R., Suleimanov A.M., Kuznetsova M.I., Kitaev S.V., KolotilovYu.V. Improvement of the composition of detergent solutions for the removal of deposits on the axial-compressor blades of gas-turbine units. *Polymer Science. Series D*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 82–85.
- Shvarts A.Yu., Antropov P.G., Dolinina O.N. Intellektualnaya sistema diagnostiki gazoperekachivayushchikh agregatov kompressornykh stantsiy [Intellectual system for diagnostics of gas pumping units of compressor stations]. Novye tekhnologii v gazovoy promyshlennosti [New technologies in gas industry]. Saratov, 16 December 2016. pp. 135–145.
- Baikov I.R, Smorodova O.V., Smorodov E.A. Primenenie rangovykh kriteriev dlya vibrodiagnostiki GPA [Application of ran-

king criteria for vibrodiagnostics of GPU]. Gazovaya promyshlennost, 2000, no. 1, pp. 42–44.

- 6. Ivanov E.S., Golyanov A.I. Perfection of operation of gas pumping units. *Oil and gas business*, 2012, no. 1, pp. 42–48. In Rus.
- Rusov V.A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam [Diagnostics of defects of rotating equipment by vibration signals]. Perm, Vibro-Tsentr Publ., 2012. 202 p.
- Vapnik V.N., Chervonenkis A.Y. On the uniform convergence of relative frequencies of events to their probabilities. *Measures of Complexity: Festschrift for Alexey Chervonenkis*. New York, Springer International Publ., 2015. pp. 11-30.
- Chervonenkis A.Y. Problems of machine learning. Lecture Notes in Computer Science, 2011, V.6744 LNCS, pp. 21–23.
- Vetter T., Poggio T. Linear Object Classes and Image Synthesis from a Single Example Image. *Transactions on Pattern Analysis* and Machine Intelligence, 1997, vol. 19, pp. 733-742.
- Dai Y., Nakano Y. Recognition of facial images with low resolution using a Hopfield memory model. *Pattern Recognition*, 1998, vol. 31, pp. 159–167.
- Himmelbolou D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods]. Moscow, Mir Publ., 1973. 957 p.
- Saaty T.L. Decision making with the analytical hierarchy process. *International Journal «Services Sciences»*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 83–98.

- Figueira J., Greco S., Ehrgott M. Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. New York, Springer, 2016. pp. 27-38.
- Foresti G.L. Outdoor Scene Classification by a Neural Tree-Based Approach. Pattern Analysis and Applications, 1999, vol. 2, no. 2, pp. 129–142.
- Temple T.W., Fokz F.L., Jamalallail H.R. System monitors gasturbine maintenance. *Oil and Gas Journal*, 1980, vol. 78, no. 38, pp. 105–113.
- Nouretdinov I., Costafreda S.G., Gammerman A., Chervonenkis A., Vovk V., Vapnik V., Fu C.H.Y. Machine learning classification with confidence: application of transductive conformal predictors to MRI-based diagnostic and prognostic markers in depression. *NeuroImage*, 2011, vol. 56, pp. 809–813.
- Smorodov E., Deev V. Application of Serial Statistics for Diagnostics of the Oil and Gas Equipment. *Journal of Fushun petroleum Institute*, 2000, no. 4, pp. 52–57.
- Kitaev S.V., Ivanov E.S., Galikeev A.R. Povyshenie energoeffektivnosti rezhimov raboty tekhnologicheskogo oborudovaniya kompressornykh stantsiy magistralnykh gazoprovodov [Increase of energy efficiency of operation modes of technological equipment of compressor stations of main gas pipelines]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2016. 200 p.
- Bakowski K., Bakowski P. Systemy ochronne w stacjach redukcji gazu [Protective systems in gas reduction stations]. *Gaz, Woda i Technika Sanitaria*, 1996, no. 5, pp. 167–179. In Polish.
- 21. Baikov I.R., Smorodov E.A., Smorodova O.V. Generatsiya sverkhnizkikh chastot pri rabote gazoperekachivayushchikh agregatov i ikh vliyanie na spektr vibratsii [Generation of ultralow frequencies during operation of gas-pumping aggregates and their influence on the vibration spectrum]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz, 1999, no. 4, pp. 62-67.

Received: 29 May 2018.

### Information about the authors

Igor R. Baykov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Olga V. Smorodova, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

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

Airat M. Shammazov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 661.832.321

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ПЫЛЕВИДНОГО ГАЛУРГИЧЕСКОГО ХЛОРИДА КАЛИЯ

# Черепанова Мария Владимировна<sup>1</sup>,

syromyatnikova.maria@yandex.ru

# Кузина Евгения Олеговна<sup>1</sup>,

zena322myname@mail.ru

# Пойлов Владимир Зотович<sup>1</sup>,

vladimirpoilov@mail.ru

# Мунин Дмитрий Андреевич<sup>1</sup>,

demon011093@yandex.ru

1 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность.** Образующийся в промышленности пылевидный галургический хлорид калия (КС1) смешивают с готовым кондиционным продуктом, что приводит к его пылимости и слеживаемости, а также потерям при транспортировании. Укрупнение пылевидного КС1 позволит повысить качество основного продукта за счет исключения стадии смешения разнофракционных компонентов. Агломерация формованием позволит получить продукт размером, близким к концентрату. Исследование особенностей агломерации с различными связующими позволит изучить их влияние на эффективность процесса и качество получаемого продукта.

**Цель:** изучение процесса формования пылевидного галургического хлорида калия и установление особенностей агломерации увлажненной тукосмеси с использованием связующих различного вида.

**Методы.** Для изучения состояния поверхности агломератов применяли электронно-сканирующую микроскопию с использованием режимов съемки BSE3D и SE при увеличении до 1500Х; для определения элементного состава образовавшихся в процессе формования и сушки тукосмеси областей использовали рентгеноспектральный анализ; качество получаемого продукта оценивали с применением ситового анализа и метода измерения статической прочности на приборе ИПГ-1М.

**Результаты.** Установлено, что повышение влажности гранулируемой смеси способствует увеличению содержания товарной фракции до 84 % и статической прочности до 10 Н/гранулу; использование связующих оказывает положительное влияние на качество продукта (повышая выход и прочность агломератов), при этом они могут иметь принципиально различные особенности процесса формования пылевидного галургического КС1, приводящие к образованию агломератов с существенными отличиями структуры, что подтверждено применением электронной микроскопии. Применение метасиликата натрия позволяет получить агломераты с плотным прилеганием частиц между собой, а иглообразные кристаллы оксида кремния, образовавшиеся за счет термического разложения Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O, увеличивают шероховатость частиц КС1, число центров кристаллизации и способствуют упрочнению связей в грануле. При использовании мелассы образующиеся агломераты имеют частицы КС1 с плотным контактом, но между ними видны остатки связующего; на их поверхности присутствуют скопления микрочастиц размером 10–30 мкм исходного пьлевидного сырья в виде «панциря».

#### Ключевые слова:

Пылевидный галургический хлорид калия, гранула, агломерация, формование, электронная микроскопия, статическая прочность, товарная фракция, частица.

### Введение

В процессе производства галургического хлорида калия в технологическом цикле на стадии сушки образуется до 20 % пылевидной фракции хлорида калия (КС1), имеющего низкие показатели качества. На сегодняшний день в промышленности нетоварную фракцию смешивают с готовым кондиционным галургическим КС1, что приводит к пылимости и слеживаемости продукта, потерям при транспортировании, низкой усвояемости питательных веществ растениями [1-4]. Устранить указанные недостатки возможно за счет исключения смешения пылевидного КС1 с готовым галургическим КС1 и получения из него товарного продукта с размером частиц высокой прочности, близким к концентрату хлористого калия. В связи с этим актуальной проблемой является поиск путей

укрупнения частиц пылевидного галургического KCl.

При анализе литературы установлено, что для укрупнения тонкодисперсных порошков возможно применение крупнотоннажных технологий, таких как:

- агломерация КС1 в аппаратах кипящего слоя (КС) [5–7];
- гранулирование пылевидного КС1 окатыванием [8];
- гранулирование окатыванием с предварительным формованием увлажненной тукосмеси пылевидного КС1 [9].

При агломерации пылевидных фракций КС1 в псевдоожиженном слое [5] на твердые частицы напыляется через форсунки раствор связующего. Содержащаяся в каплях раствора жидкая фаза налипает на частицы, способствует их агломерации. Зародышами агломератов являются частицы либо их осколки, появляющиеся при дроблении (безрецикловые процессы), либо специально вводимые частицы ретура, отбираемые из выгружаемого из слоя гранулированного продукта (рецикловые процессы). В процессе гранулирования в объеме КС происходит интенсивное перемешивание пылевидной фракции и раствора связующего, приводящее к выравниванию температур и концентраций, это способствует снижению вероятности локального перегрева, который может нарушить протекание технологического процесса и ухудшить качество продукта. Поверхность контакта фаз велика и приближается к суммарной поверхности частиц. Текучесть псевдоожиженного слоя позволяет создавать аппараты непрерывного действия, в которых можно гранулировать вещества, находящиеся в различных агрегатных состояниях: порошки, пасты, растворы, суспензии и т. д. Аппараты с псевдоожиженным слоем имеют простое устройство, легко поддаются автоматизации и механизации [10].

Далее капли жидкой фазы испаряются. Обезвоживание единичной капли можно отнести к процессу совместного тепло- и массообмена, протекающему взаимосвязано внутри высушиваемого влажного материала. Макрокинетика гранулирования в КС имеет несколько особенностей, обусловленных тем, что в реальном аппарате псевдоожиженного слоя одновременно находится сотни тысяч и миллионы частиц. Эти частицы имеют различные размеры, и они движутся с различными скоростями и в разных направлениях. В связи с малым размером частиц исходного сырья основной проблемой проведения процесса агломерации в печах КС является трудность создания равномерной зоны интенсивного теплообмена, где частицы обдуваются горячими газами (толщина слоя от 5 до 50 размеров частиц), и эффективной зоны орошения порошка, так как при малом размере частиц практически невозможно провести равномерное распределение раствора связующего путем тонкого распыления (диспергирования).

За счет большой линейной скорости для создания равномерной зоны формирования агломератов и малого времени контактирования, недостаточного для сцепления частиц с раствором связующего, в промышленных печах КС процесс агломерации тонкодисперсных порошков сопровождается:

- большим уносом исходного пылевидного материала, что приводит к увеличению нагрузки на технологическое оборудование, предназначенное для очистки отходящего газа (циклоны, рукавные фильтры и т. д.);
- образованием крупных спеченных агломератов в зоне орошения (расположения форсунок) с недостаточной прочностью.

Проводить агломерацию пылевидного КС1 в аппаратах КС неэффективно и энергозатратно.

Гранулирование методом окатывания [8] характеризуется перемещением гранулируемой тукосмеси по поверхности аппарата, частицы смеси перекатываются по его стенкам. Окатывание является разновидностью структурной грануляции. Непрерывное движение гранулируемой смеси способствует зародышеобразованию и росту гранул, а также разрушению наименее прочных из них. При одновременном протекании этих противодействующих процессов образуются и сохраняются прочные и примерно одинаковые гранулы. При окатывании возможно сухое, граничное и влажное гранулирование с образованием твердых мостиков. Классическая схема окатывания: порошок, орошаемый связующим, подают во вращающийся аппарат, который установлен горизонтально или с небольшим наклоном. Смоченные частички агломерируются и, окатываясь, приобретают необходимые плотности и размеры.

Когда барабан вращается, часть смеси захватывается стенкой аппарата, поднимается и сползает вниз или падает с некоторой высоты. Степень заполнения аппарата, отношение величин внутреннего и внешнего трения, а также скорость вращения барабана определяют высоту подъема и количество захваченной гранулируемой смеси. При подъеме гранулируемая смесь движется совместно с барабаном, затем начинается скатывание, что приводит к увеличению размера, уплотнению и формированию гранул. В плане роста частиц для гранулируемого материала процесс окатывания является циклическим. Чем ближе разгрузочная часть барабана, тем медленнее происходит рост гранул. Готовый продукт представляет собой сферические гранулы диаметром от 1,0 до 5,0 мм. Свойства тукосмеси и содержание связующего влияют на величину гранул [10]. Недостатками метода окатывания являются сравнительно низкая прочность гранулята и сложность управления размерами гранул.

Для упрочнения гранул используют гранулирование окатыванием с предварительным формованием. В этом случае исходную порошкообразную смесь смешивают со связующим веществом и увлажняют. Полученную увлажненную тукосмесь формуют через перфорированные приспособления с заданными размерами ячеек. После чего проводят процесс окатывания и сушки. Исследования в этом направлении пока немногочисленны. В литературе [4, 11] представлены данные по получению минеральных удобрений из циклонной пыли флотационного КС1 методом окатывания с предварительным продавливанием тукосмеси через перфорированные ячейки. За счет использования предварительного формования увеличивается выход и прочность гранулята [12]. Характеристики получаемого продукта при этом зависят от природы и свойств связующего, влажности тукосмеси, параметров и режимов формования и окатывания.

При гранулировании пылевидных частиц окатыванием, независимо от наличия стадии формования, получаемый продукт будет иметь сферическую форму (диаметр 2–5 мм), а при его производстве необходимо вводить растворы реагентов, позволяющие сформировать прочную и плотную структуры, а также повысить эффективность гранулирования. Введение таких растворов приведет к снижению содержания КС1 в грануляте. Данный продукт может не найти широкого спроса, т. к. получаемый в промышленности галургический хлористый калий с фракционным сотовом до 1,0 мм применяется либо для получения калий-содержащих соединений, либо входит в состав тукосмесей, как компонент комплексных удобрений.

Применение агломерационного формования позволит получить продукт размером, близким к галургическому КС1. Данный способ имеет высокую производительность и эффективность, а также простое аппаратурное оформление, которое может быть установлено на действующем предприятии.

В связи с этим представляет научный и практический интерес исследование процесса агломерационного формования увлажненного пылевидного галургического КС1.

Для решения проблемы переработки пылевидной фракции галургического КС1 методом формования необходимо решить следующие задачи: изучить влияние степени увлажнения тукосмеси на эффективность агломерации, определить возможность агломерационного гранулирования пылевидного галургического КС1 без добавления и с добавлением связующего вещества; исследовать влияние содержания связующих веществ и содержания влаги при агломерации на статическую прочность и гранулометрический состав полученного продукта; изучить особенности процесса агломерации увлажненного пылевидного галургического КС1 с использованием связующих различного вида.

### Материалы и метод исследования

Методика эксперимента по исследованию процесса агломерационного гранулирования путем формования заключалась в следующем: исходный пылевидный галургический хлорид калия с размером частиц менее 0,094 мм увлажняли до заданной величины и смешивали с расчетным количеством раствора связующего. Полученную смесь перемешивали до однородного состояния, после чего подвергали формованию на лабораторном вертикальном грануляторе через сетку с размером 1,0 мм. После этого агломерированный КС1 сушили при температуре 120 °С в течение 20 минут. Далее измеряли остаточную влажность продукта на анализаторе влажности MS-70 фирмы A&D. Гранулометрический состав определяли с помощью ситового анализа и статическую прочность агломерированного продукта измеряли на приборе ИПГ-1М по известной методике [13]. Эффективность процесса агломерационного формования оценивали по следующим показателям: содержание фракции более 0,630 мм, статическая прочность и средний размер частиц продукта.

В качестве объекта исследования использовали пылевидный галургический хлорид калия (технический), образующийся на стадии сушки в сушильном отделении БКПРУ-1 ПАО «Уралкалий» (г. Березники, Пермского край). Пылевидный галургический КС1 – мелкие кристаллы серовато-белого цвета с размером менее 0,094 мм, имеет следующий состав (% масс.): КС1 не менее 98,2 %, NaCl не более 1,6 %, H<sub>2</sub>O не более 0,5 %.

Размер и морфологию частиц исходного пылевидного галургиче ского хлорида калия анализировали на электронном микроскопе S-3400N (Hitachi) (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Микрофотография частиц пылевидного галургического КС1 (увеличение 250Х)

Fig. 1. Microphotography of the particles of pulverized galurgical KC1 (magnification 50X)



**Рис. 2.** Микрофотография частиц пылевидного галургическогоКС1 (увеличение 2000Х)

Fig. 2. Microphotography of the particles of pulverized galurgical KC1 (magnification 2000X)

Анализ микрофотографий (рис. 1, 2) показал, что частицы пылевидного галургического КС1 представляют собой агломераты, состоящие из кристаллов хлоридов калия и натрия с кубической, овальной, осколочной и неправильной формами. При этом поверхность частиц ровная и гладкая, без пор. Наличие кристаллов различных форм связано с тем, что пылевидный КС1 на стадии сушки продукта в печах КС подвергается термическому и механическому разрушению, столкновениям частиц между собой и стенками аппарата. При этом частицы КС1 имеют большой разброс по размерам – от 50 нм до крупных агломератов размером более 90 мкм.

### Результаты исследований

Степень увлажнения исходной смеси значительно влияет на качество получаемого продукта и эффективность агломерации [14, 15]. Поэтому первоначально исследовали влияние ступени увлажнения пылевидного КС1 на гранулометрический состав, статическую прочность и средний размер частиц агломерированного продукта. Увлажнение проводили водой. Результаты исследований представлены в табл. 1.

- Таблица 1. Влияние степени увлажнения пылевидного галургического КС1 на гранулометрический состав, статическую прочность и средний размер частиц агломерированного продукта
- Table 1.
   Effect of moistening degree of the pulverized halurgic

   KC1 on particle size distribution, static strength and

   average particle size of the agglomerated product

	Содержание фракции, % Fraction content, %						
Размер фракции, мм Fraction size, mm	Степень увлажнения пылевидного КС1, % Humidification degree of pulverized КС1, %						
	10	15	17,5	20			
+0,630	10,49	26,10	56,80	84,70			
-0,630+0,355	18,70	41,00	34,10	9,75			
-0,355+0,094	59,30	29,50	7,43	3,98			
-0,094	11,51	3,40	1,65	1,56			
Средний размер ча- стиц, мм Average size of partic- les, mm	0,30	0,45	0,58	0,65			
Средняя статическая прочность, Н/гранула Average static strength, N/pellet	_	_	_	10,2±0,2			

При повышении степени увлажнения КС1 с 10 до 20 % содержание фракции более 0,630 мм возрастает в 8 раз с 10,49 до 84,7 %, а количество пылевидной фракции класса менее 0,094 мм снижается почти на 10 % с 11,51 до 1,56 %. Максималь-

ный средний размер частиц получаемого агломерата 0,65 мм и статическая прочность 10,2 Н/гранула получены при степени увлажнения 20 %. При степени увлажнения менее 20 % статическая прочность агломератов очень мала. Увеличение степени увлажнения пылевидного КС1 способствует повышению пластичности исходной тукосмеси, а также положительно влияет на качество получаемого агломерированного КС1.

Вид и расход связующего являются существенным параметром проведения процесса. В качестве связующих использовали вещества, отличающиеся по своей природе: связующее органического происхождения – меласса (побочный продукт производства сахара), содержит 20-25 % воды, 9-10 % азотистых соединений (амидов), 58-60 % углеводов (сахаров) и 7-10 % золы [16, 17] и 10%-й водный раствор метасиликата натрия (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O) [18–20], минеральное неорганическое связующее, которое широко применяется как упрочняющая добавка.

Исследование вида и содержания связующего проводили при степени увлажнения КС1 20 %, результаты исследований приведены в табл. 2.

Из анализа приведенных данных (табл. 2) следует, что вид, содержание и природа связующего оказывают значительное влияние на качество получаемого агломерата. Введение минерального неорганического раствора связующего метасиликата натрия эффективно только при его содержании более 1 %, происходит упрочнение агломератов до 19,23 Н/гранулу, но выход товарной фракции низкий (76-86 %). В процессе сушки агломерата при повышенных температурах в присутствии воды (степень увлажнения 20 %) связующее подвергается гидролизу.

Выделяющийся при гидролизе гель кремниевой кислоты обладает вяжущими свойствами [21]. Небольшого количества раствора метасиликата натрия (менее 1 %) недостаточно для связывания пылевидных частиц галургического КС1.

Введение в увлажненную тукосмесь связующего мелассы содержанием 0,3 % не приводит к повышению эффективности формования. Максимальный выход (содержание фракции более

Таблица 2.Влияние вида и расхода связующего на гранулометрический состав и статическую прочность агломерированного КС1Table 2.Influence of the type and consumption of the binder on granulometric composition and static strength of the agglomerated КС1

Размер фракции, мм	Содержани Content of	ие 10 %-го ра 10 % water s	аствора Na <sub>2</sub> Si solution Na <sub>2</sub> Si	Содержание мелассы, % Melasses content, %				
Fraction size, mm	0,3	0,5	0,7	1,0	0,3	0,5	0,7	1,0
	Содержание фракции, %/Fraction content, %							•
+0,630	76,13	75,43	83,33	86,35	72,30	87,30	95,13	96,8
-0,630+0,355	14,73	13,70	9,32	8,73	18,05	4,41	3,23	1,57
-0,355+0,094	7,72	9,31	6,25	5,85	8,38	7,67	1,28	1,22
-0,094	1,41	1,56	1,10	1,03	1,27	0,62	0,35	0,41
Средний размер частиц, мм Average particles size, mm	0,62	0,62	0,64	0,65	0,61	0,65	0,68	0,69
Средняя статическая прочность, H/гранула Average static strength, N/pellet	12,3±0,2	$14,7{\pm}0,1$	$17,6{\pm}0,3$	$19,2{\pm}0,2$	$11,5{\pm}0,2$	$15,2{\pm}0,3$	$22,2{\pm}0,3$	$22,9{\pm}0,2$

0,630 мм) 96,8 % и статическая прочность агломерированного продукта 22,9  $\rm H/$ гранула достигаются при использовании в качестве связующего мелассы с содержанием в тукосмеси 1,0 %. Это можно объяснить тем, что меласса за счет своих свойств «склеивает» увлажненные частицы КС1 между собой, а на стадии сушки происходит их дополнительное упрочнение и цементация.

Для установления особенностей процесса агломерации увлажненного пылевидного КС1 с использованием различных связующих изучили структуру и морфологию агломерированного продукта на электронном сканирующем микроскопе с приставкой «Bruker» для рентгеноспектрального анализа. Ниже представлены микрофотографии агломератов, полученных с использованием раствора метасиликата натрия (рис. 3) и мелассы (рис. 4).



Рис. 3. Микрофотография агломерата, полученного из пылевидного галургического КС1 с использованием метасиликата натрия (увеличение 80Х)

Fig. 3. Photomicrograph of the agglomerate obtained from pulverized galurgical KC1 using sodium metasilicate (magnification 80X)



Рис. 4. Микрофотография агломерата, полученного из пылевидного галургическогоКС1 с использованием мелассы (увеличение 80Х)

Fig. 4. Photomicrograph of the agglomerate obtained from pulverized galurgical KC1 using melasses (magnification 80X)

Анализ микрофотографий (рис. 3, 4) показал, что у получаемых агломератов достаточно плотная упаковка, входящие в них частицы плотно прилегают друг к другу, за счет наличия солевых мостиков, но на их поверхности видны дефекты в виде трещин и каверн. Форма агломератов овальная, чаще неправильная, вытянутая. На поверхности более крупных частиц присутствуют мелкие осколочные частицы кубической, сферической, трапециевидной и неправильной форм. Сросшиеся контакты и солевые мостики между частицами упрочняют агломераты. При большем увеличении установлено, что агломераты, полученные с различными связующими, значительно отличаются.



- Puc. 5. Микрофотография частиц агломерата, полученного из пылевидного галургического КС1 с использованием метасиликата натрия с формованием (режим BSE3D, увеличение 1500X)
- Fig. 5. Photomicrograph of the agglomerate particles obtained from pulverized galurgical KC1 using sodium metasilicate with molding (mode BSE3D, magnification 1500X)



**Рис. 6.** Микрофотография частиц агломерата, полученного из пылевидного галургического КС1 с использованием метасиликата натрия без формования (режим SE, увеличение 1000X)

Fig. 6. Photomicrograph of the agglomerate particles obtained from pulverized galurgical KC1 using sodium metasilicate without molding (mode SE, magnification 1000X)
На рис. 5 приведены микрофотографии поверхности агломерата, полученного с Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O, и видно плотную упаковку частиц КС1. Частицы в местах их соприкосновения сглажены. На поверхности видны иглообразные кристаллы (за счет съемки в режиме BSE3D они имеют черный цвет), характерные для соединений кремния [22].

На рис. 6 представлено изображение поверхности частицы КС1, полученной без формования с использованием метасиликата натрия. На поверхности частиц КС1, расположенных удаленно (на расстоянии) друг от друга, видны иглообразные кристаллы белого цвета (за счет съемки в режиме SE). Из литературных данных известно, что частицы SiO<sub>2</sub> имеют вытянутую, иглообразную форму [23]. При сравнении данных микрофотографий (рис. 5, 6) установлено, что процесс формования способствует получению плотных гранул с близким соприкосновением частиц КС1 в агломератах, имеющих высокую статическую прочность.

Можно предположить, что процесс агломерации галургического хлорида калия происходит следующим образом. Тонкодисперсные частицы хлорида калия растворяются частично парами воды и прилипают к поверхности других агломерируемых частиц. Далее следует стадия кристаллизации в точке контакта с формированием солевого мостика. Вводимый метасиликат натрия при быстром испарении воды с поверхности частицы образует кристаллы в виде игл, что приводит к повышению шероховатости частиц, упрочнению агломератов, а также способствуют присоединению к ним новых тонкодисперсных частиц. За счет термического разложения метасиликата натрия образуются новые центры кристаллизации, происходит заращивание мест контакта частиц КС1, образование крупных и прочных агломератов.

Основным условием образования игольчатых кристаллов силиката натрия является наличие высокой влажности (более 10 %) высушиваемой тукосмеси. В процессе термогидролиза метасиликата натрия происходит образование оксида кремния [24]. Единичные кристаллы SiO<sub>2</sub> представляют собой вытянутые шестигранные столбчатые кристаллы с пирамидальной (шести- или трехгранной) верхушкой. При этом за счет высокой скорости сушки в начальный момент процесса происходит быстрый рост кристаллов SiO<sub>2</sub> в единицу времени. Образуются вытянутые столбчатые кристаллы в виде тонких игл. При идентичных условиях проведения исследований по получению агломерата из мелкодисперсного КС1 с метасиликатом натрия методом формования при низкой влажности тукосмеси образования иглообразных кристаллов не происходит, а получаемый продукт имеет низкую прочность и выход товарной фракпии.

На рис. 7 представлена микрофотография поверхности агломерата КС1, полученного из пылевидного галургического хлорида калия с использованием мелассы с содержанием 0,7 % при степени увлажнения 20 % (с метками ▲ и ° в точках, в которых осуществляли рентгеноспектральный анализ).



**Рис 7.** Поверхность агломерата, полученного из пылевидного галургического хлорида калия с использованием мелассы (режим BSE3D, увеличение 1000X)

Fig. 7. Surface of the agglomerate obtained from pulverized halurgic potassium chloride using melasses (mode BSE3D, magnification 1000X)

На поверхности агломерата видны частицы КС1 кубической, овальной и неправильной формы (белого цвета), со сглаженными гранями. Все частицы плотно соединены между собой, в местах их контакта видно наличие «соединителя» – вещество темного (черного) цвета, находящееся между граней КС1. Предположительно это остатки мелассы. Также на поверхности видны скопления мелкодисперсных частиц в виде «панциря», с наличием между нами вещества темного цвета.

На поверхности агломерата присутствует зона темного цвета, внедренная между плотно прилегающими частицами КС1, видимая часть имеет размеры 5×8 мкм. Проведенный рентгеноспектральный анализ показал, что данная область имеет следующий элементный состав (масс. %): С – 26,63, О – 13,69; Na – 2,90; Cl – 30,29; K – 26,49. Анализ участка поверхности агломерата, обозначенного меткой ▲, показал, что в нем присутствуют такие элементы, как К, Na, Cl, и полностью отсутствует углерод.

Видимые на рис. 7 участки черного цвета являются остаточными соединениями мелассы, образовавшимися после сушки агломерата.

На основе полученных данных можно представить следующие особенности процесса агломерации увлажненного пылевидного галургического КС1 при использовании в качестве связующего мелассы. На первом этапе, на стадии увлажнения, грани частиц КС1 начинают растворяться и прилипать друг к другу. После введения в увлажненный КС1 мелассы, за счет ее повышенной вязкости и склеивающей способности, пылевидные частицы фиксируются друг с другом. Кристаллы 10-30 мкм сгруппировываются на поверхности агломерата, образуя скопления неправильной рыхлой формы в виде «панциря». За счет последующего агломерирования тукосмеси путем формования происходит уплотнение уже структурированной увлажненной смеси ее продавливанием через ячейки. В результате меласса, находясь между частицами КС1, укрепляет структуру агломератов. За счет последующей сушки происходит фиксация и цементация склеенных частиц. Помимо этого «липкая» меласса за счет собственных свойств и разложения образует много центров кристаллизации, способствующих упрочнению связей между частицами. В процессе формования и сушки происходит заращивание мест контакта и образование крупных прочных агломератов.

## Заключение

В ходе исследований изучено влияние степени увлажнения на эффективность процесса агломерации. Установлено, что повышение содержания влаги в гранулируемой смеси приводит к увеличению содержания фракции более 0,630 мм до 84 %, а статическая прочность агломератов достигает 10 H/гранулу.

Определена возможность агломерации КС1 формованием без использования связующих. Однако их введение в тукосмесь способствует увеличению выхода товарной фракции более чем на 10 % и упрочнению в 2 раза полученных агломератов.

Повышение содержания связующих оказывает положительное влияние на качество продукта. При введении 1 % раствора метасиликата натрия статическая прочность увеличивается на 9 Н/гранулу, а содержание крупной фракции – на 2 %. При формовании КС1 с 1 % мелассы в продукте увеличивается на 12 % выход и на 12 Н/гранулу прочность.

На основе проведенных исследований установлено, что в качестве связующих возможно применение различных по своей природе веществ. При этом данные соединения могут повышать прочность продукта, выход товарной фракции, увеличивать эффективность агломерации, но иметь принципиально различные особенности процесса гранулирования пылевидного галургического КС1.

За счет проведенного анализа микрофотографий поверхности агломератов, полученных из пылевидного галургического хлорида калия с использованием метасиликата натрия и мелассы, выявлены существенные отличия структуры частиц.

При использовании в качестве связующего метасиликата натрия образуются агломераты с плотным прилеганием частиц между собой, а на их поверхности видны иглообразные кристаллы оксида кремния, образовавшиеся за счет термического разложения $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ , увеличивающие шероховатость частиц КС1, число центров кристаллизации и способствующие упрочнению связей в грануле. Установлено, что формование смеси способствует получению прочных агломератов плотной структуры, в которых частицы КС1 непосредственно соприкасаются между собой.

При использовании мелассы также образуются агломераты с плотным контактом частиц КС1, однако между ними видны остатки связующего (темные области на границах соприкосновения хлорида калия). На поверхности агломератов на участках с большим количеством мелассы присутствуют скопления (образования) частиц размером 10-30 мкм исходного пылевидного сырья в виде «панциря», т. е. меласса, распределяясь в тукосмеси по поверхности частиц, после гранулирования методом формования, плотно «склеивает» частицы, увеличивая прочность, а в местах ее избытка на поверхности образуются скопления тонкодисперсных частиц, приводящие к повышению выхода товарной фракции более 0,630 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Gebreslassie H.B. Effect of Potasium Fertilizer on Crop Production // Journal of Natural Sciences Research. 2016. V. 6.  $N_{2}$  7. P. 81–86.
- Neshev N., Manolov I. Potassium fertilizer rate and source influence content, uptake and allocation of nitrogen, phosphorus and potassium in potato plants // Conference VIVUS on Agriculture, Environmentalism, Horticulture and Floristics, Food Production and Processing and Nutrition. Slovenia: Biotechnical Centre Naklo, 2017. V. 4. P. 1–6.
- Влияние условий хранения и транспортировки на физико-механические свойства гранулированного хлорида калия / М.В. Черепанова, И.С. Потапов, В.З. Пойлов, К.В. Попова, С.Н. Алиферова // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – № 13. – С. 35–42.
- Назаров В.И., Макаренков Д.А. Гранулирование комплексных удобрений и реологические и физико-химические свойства компонентов // Вестник МГОУ. Естественные науки – 2011. – № 4. – С. 143–148.
- Improved method of manufacturing an agglomerated potassium chloride fertilizer: pat. USA № 2107702; reported 21.09.1934; publ. 08.02.1938. - 2 p.
- Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А. Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ // Журнал ИГХТУ, Современные наукоемкие технологии. 2017. № 3 (51). С. 86–91.
- Возможности повышения эффективности переработки смесей промбытотходов путем гранулирования / А.С. Парфенюк, А.И. Кутняшенко, Д.И. Тасиц, Ш. Хайнрих, С.И. Антонюк // Экологические проблемы индустриальных мегаполисов: материалы III международной научно-практической конференции. – Украина: Донецк, 2010. – Т. 6. – С. 206–209.
- Сковородников П.В., Черепанова М.В. Способы гранулирования органоминеральных удобрений // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 3. С. 117–127.
- Iskandar A., Yuliasih I., Haryanto D.B. Effect of temperature and time on dry granulation process // International Journal of Research in Engineering and Technology. - 2014. - V. 2. -P. 33-44.
- Процессы гранулирования в промышленности / Н.Г. Вилесов, В.Я. Схрипков, В.Л. Ломазов, И.М. Танченко. – М.: Техника, 1976. – 192 с.
- Федотова О.А. Разработка технологии получения гранулированных NPK удобрений методом окатывания на основе сульфата аммония и хлорида калия, содержащего примеси фотореагентов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2012. – 127 с.

- Physicochemical properties of fertilizers available on market and possibility of production of blended fertilizers / A. Biskupski, S. Schab, A. Myka, M. Dawidowicz // Chemik. – 2012. – V. 66. – P. 541–548.
- ГОСТ 21560.2–82. Удобрения минеральные. Метод определения статической прочности гранул. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 4 с.
- Способ получения хлористого калия: пат. Рос. Федерация, № 2652256; заявл. 27.06.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12. – 7 с.
- Gluba T. The effect of wetting liquid droplet size on the growth of agglomerates during wet drum granulation // Powder Technology. - 2003. - № 130. - P. 219-224.
- Coal tar pitch and molasses blended binder for production of formed coal briquettes from high volatile coal / Q. Zhong, Q. Li, Y. Yang, T. Jiang // Fuel Processing Technology. -2017. -V. 25. - P. 89-97.
- Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. М.: Современная школа, 2005. 608 с.
- Microstructural and mechanical properties of silica PEPEG polymer composite xerogels / M.M. Kulkarni, R. Bandyopadhyaya, B. Bhattacharya, A. Sharma // Acta Materialia. 2006. № 54. P. 5231–5240.
- Vehmas T., Kanerva U., Holt E. Spray-dry agglomerated nanoparticles in ordinary portland cement matrix // Materials Sciences and Applications. - 2014. - V. 5. - P. 837-844.
- Water content modifies the structural development of sodium metasilicate-activated slag binders / S.A. Bernal, R.S. Nicolas, S.J. van Deventer, J.L. Provis // ALCONPAT Journal. - 2015. -V. 5. - P. 30-41.
- Корнеев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое. СПб.: Стройиздат, 1996. – 216 с.
- Черепанова М.В., Пойлов В.З. Взаимодействие связующего силиката калия с примесными компонентами при формировании гранул КСІ методом окатывания // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. С. 41–49.
- Григорьев П.Н., Матвеев М.А. Растворимое стекло: получение, свойства и применение. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1956. – 443 с.
- 24. Филиппович Е.Н., Хацринов А.И., Скворцов А.В. Выбор оптимальных условий термической обработки диатомита Инзенского месторождения Ульяновской области для синтеза кристаллических силикатов натрия // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - № 5. - С. 83-86.

Поступила 25.12.2018 г.

## Информация об авторах

*Черепанова М.В.*, кандидат технических наук, доцент кафедры химические технологии Химико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

*Кузина Е.О.*, инженер кафедры химические технологии Химико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Пойлов В.З.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химические технологии Химикотехнологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

*Мунин Д.А.*, магистр кафедры химические технологии Химико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

#### UDC 661.832.321

## RESEARCH OF PULVERIZED HALURGIC POTASSIUM CHLORIDE AGGLOMERATION

## Mariya V. Cherepanova<sup>1</sup>,

syromyatnikova.maria@yandex.ru

## Evgenia O. Kuzina<sup>1</sup>,

zena322myname@mail.ru

### Vladimir Z. Poylov<sup>1</sup>,

vladimirpoilov@mail.ru

## Dmitry A. Munin<sup>1</sup>,

demon011093@yandex.ru

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance.** The industrial pulverized halurgic potassium chloride (KC1) is mixed with the finished conditioning product, which leads to its dustiness and caking, as well as losses during transportation. The enlargement of the pulverized KC1 will increase the quality of the main product, by eliminating the mixing stage of different components. The agglomeration by molding will make it possible to obtain a product of a size close to the concentrate. Investigation of agglomeration features with various binders will allow studying their influence on the efficiency of the process and the quality of the product obtained.

**The main aim** of the research is to study the molding of pulverized halurgic potassium chloride and to establish agglomeration features of moistened fertilizer using various binders.

**Methods.** To study the state of the agglomerates surface, electron-scanning microscopy was applied using the shooting modes BSE3D and SE with an increase to 1500X; to determine the elemental composition formed in molding and drying the fertilizer mixture, the X-ray spectral analysis was used; the quality of the resulting product was evaluated using a sieve analysis and the method of measuring the static strength of an IPG-1M instrument.

**The results.** It was found that increasing the moisture content of the granulated mixture promotes an increase in the content of the commodity fraction to 84 % and a static strength up to 10 N/granule; the use of binders has a positive effect on the quality of the product (increasing the yield and strength of the agglomerates), and they can have fundamentally different features of molding the pulverized halurgic KC1, resulting in formation of agglomerates with significant structural differences, as confirmed using electron microscopy. The use of sodium metasilicate makes it possible to obtain agglomerates with a tight adherence of particles to each other, and the needle-shaped crystals of silicon oxide formed by the thermal decomposition of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O increase the roughness of the KC1 particles, the number of crystallization centers, and strengthen the bonds in the granule. When molasses are used, the resulting agglomerates have KC1 particles with intimate contact, but the remainders of the binder are visible between them; on their surface there are accumulations of microparticles with a size of 10–30 µm of the initial pulverized raw materials in the form of «shell».

#### Key words:

Pulverized halurgic potassium chloride, granule, agglomeration, molding, electron microscopy, static strength, commodity fraction, particle.

#### REFERENCE

- Gebreslassie H.B. Effect of Potasium Fertilizer on Crop Production. Journal of Natural Sciences Research, 2016, vol. 6, no. 7, pp. 81–86.
- Neshev N., Manolov I. Potassium fertilizer rate and source influence content, uptake and allocation of nitrogen, phosphorus and potassium in potato plants. *Conference VIVUS on Agriculture, Environmentalism, Horticulture and Floristics, Food Production and Processing and Nutrition.* Slovenia, Biotechnical Centre Naklo, 2017. Vol. 4, pp. 1–6.
- Cherepanova M.V., Potapov I.S., Poylov V.Z., Popova K.V., Aliferova S.N. Influence of storage and transportation conditions on the physical and mechanical properties of granular potassium chloride. *Bulletin of the Perm national research polytechnic uni*versity, 2012, no. 13, pp. 35–42. In Rus.
- Nazarov V.I., Makarenko D.A. Complex fertilizers pelletizing and components rheological and physical properties. *Bulletin of the Moscow region state university*, 2011, no. 4, pp. 143–148. In Rus.
- Haase K., Werth H., Probst H. Improved method of manufacturing an agglomerated potassium chloride fertilizer. Patent USA, no. 2107702, 1938.

- Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. The encapsulation of granules in a polymer shells as a method of creation of mineral fertilizers with controlled speed of liberation of nutrients. *Journal ISUCT. Modern High Technologies*, 2017, no. 7 (51), pp. 86–91. In Rus.
- Parfenyuk A.S., Kutnyashenko A.I., Tasits D.I., Khaynrikh Sh., Antonyuk S.I. Vozmozhnosti povysheniya effektivnosti pererabotki smesey prombytotkhodov putem granulirovaniya [Possibilities to increase the efficiency of processing mixtures of industrial waste through granulation]. Ekologicheskie problemy industrialnykh megapolisov: materialy III mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii [Ecological problems of industrial megacities: materials III International Scientific and Practical Conference. Proc. of the eighth All Ukraine scientific conference]. Ukraine, Donetsk Publ., 2010. Vol. 6, pp. 206–209.
- 8. Skovorodnikov P.V., Cherepanova M.V. The methods of granulation organomineral fertilizers. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university*, 2017, no. 3, pp. 39–49. In Rus.
- Iskandar A., Yuliasih I., Haryanto D.B. Effect of temperature and time on dry granulation process. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 2, pp. 33-44.

- Vilesov N.G., Skhripkov V.Ya., Lomazov V.L., Tanchenko I.M. Protsessy granulirovaniya v promyshlennosti [Granulation in industry]. Moscow, Tekhnika Publ., 1976. 192 p.
- 11. Fedotova O.A. Razrabotka tekhnologii polucheniya granulirovannykh NPK udobreniy metodom okatyvaniya na osnove sulfata ammoniya i khlorida kaliya, soderzhashchego primesi fotoreagentov. Dis. Kand. nauk [Development of technology for preparing granular NPK fertilizers by pelletizing on the basis of ammonium sulfate and potassium chloride containing impurities of photoreagents. Cand. Diss.]. Perm, 2012. 127 p.
- Biskupski A., Schab S., Myka A., Dawidowicz M. Physicochemical properties of fertilizers available on market and possibility of production of blended fertilizers. *Chemik*, 2012, vol. 66, pp. 541-548.
- GOST 21560.2–82. Udobreniya mineralnye. Metod opredeleniya staticheskoy prochnosti granul [State Standard 21560.2–82. Mineral fertilizers. Method for determination of granules static strength]. Moscow, Izdatelstvo stanfartov Publ., 2003. 7 p.
- Titkov S.N., Matveev V.I., Kotlyar E.K., Shkuratskiy D.N. Sposob polucheniya khlorida kaliya [Method of obtaining potassium chloride]. Patent RF, no. 2652256, 2018.
- Gluba T. The effect of wetting liquid droplet size on the growth of agglomerates during wet drum granulation. *Powder Technology*, 2003, no. 130, pp. 219–224.
- Zhong Q., Li Q., Yang Y., Jiang T. Coal tar pitch and molasses blended binder for production of formed coal briquettes from high volatile coal. *Fuel Processing Technology*, 2017, vol. 25, pp. 89-97.
- Volkov A.I., Zharskiy I.M. Bolshoy khimicheskiy spravochnik [Great chemical directory]. Moscow, Sovremennaya shkola Publ. 2005. 608 p.

- Kulkarni M.M., Bandyopadhyaya R., Bhattacharya B., Sharma A. Microstructural and mechanical properties of silica PE-PEG polymer composite xerogels. *Acta Materialia*, 2006, no. 54, pp. 5231–5240.
- Vehmas T., Kanerva U., Holt E. Spray-dry agglomerated nanoparticles in ordinary portland cement matrix. *Materials Sciences* and Applications, 2014, vol. 5, pp. 837–844.
- Bernal S.A., Nicolas R.S., Deventer S.J., Provis J.L.Water content modifies the structural development of sodium metasilicateactivated slag binders. *ALCONPAT Journal*, 2015, vol. 5, pp. 30-41.
- Korneev V.I., Danilov V.V. Rastvorimoe i zhidkoe [Soluble and liquid]. St. Petersburg, Stroyizdat. Publ., 1996. 216 p.
- 22. Cherepanova M.V., Poylov V.Z. Interaction of a potassium silicate binder with impurity components during formation of KCl granules by the pelletizing method. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 41–49. In Rus.
- Grigoryev P.N., Matveev M.A. Rastvorimoe steklo: poluchenie, svoystva i primenenie [Soluble glass: production, properties and applications]. Moscow, State Publishing House of Literature on Building Materials, 1956. 443 p.
- 24. Filippovich E.N., Khatsrinov A.I., Skvortsov A.V. Choice of optimal conditions for thermal treatment of diatomite of the Inzen deposit of the Ulyanovsk region for the synthesis of crystalline sodium silicates. *Bulletin of the Technological University*, 2010, no. 5, pp. 83–86. In Rus.

Received: 25 December 2018.

#### Information about the authors

Mariya V. Cherepanova, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Vladimir Z. Poylov, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University.

Evgenia O. Kuzina, engineer, Perm National Research Polytechnic University.

Dmitry A. Munin, student undergraduate, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 661.481.7

## АНАЛИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ АНОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФТОРА

Софронов Владимир Леонидович<sup>1</sup>,

VLSofronov @mephi.ru

Молоков Петр Борисович<sup>1</sup>,

PBMolokov@mephi.ru

Муслимова Александра Валерьевна<sup>1</sup>,

klameri7@gmail.com

## Полянская Анна Вадимовна<sup>1</sup>,

AVPolyanskaya@mail.ru

## **Дамм Юрий Петрович**<sup>2</sup>, damm u p@mail2000.ru

Рудников Андрей Иванович<sup>2</sup>,

Rudnikov.a.i@yandex.ru

- <sup>1</sup> Северский технологический институт филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.
- <sup>2</sup> Сублиматный завод АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1.

Актуальность исследования. Единственным промышленным способом получения фтора является электролиз фтороводорода из расплавов гидрофторидов калия системы КF пНF. При этом в основном используют среднетемпературные (95−105 °C) электролизеры с электролитом состава KF·2HF на силу тока от 5 до 40 кА. Электролизер является весьма сложным аппаратом, в котором решено множество проблем, связанных с агрессивностью сред фтора, фтороводорода и других фторидов. В то же время существует технологическая задача увеличения эксплуатационной стойкости анодов, которые изготавливают из углеродных пластин. Углерод имеет в зависимости от строения материала различную структуру: графит, сажа, кокс, алмаз и другие. Для среднетемпературного электролиза наиболее устойчивой формой углерода, в которой углерод имеет разупорядоченную рентгенаморфную структуру, оказался кокс, поэтому эти пластины называют коксовыми. Коксовые пластины получают в основном из нефтяного пиролизного малосернистого кокса определенного фракционного состава и каменноугольного пека. В последнее время качество коксовых пластин стало крайне низким: некоторые компоненты пластин были заменены на более дешевые, например, нефтяной пек – на каменноугольный. Качество коксовых пластин российских производителей должно соответствовать требованиям ТУ 48–12–34–95 «Пластины коксовые обожженные». В ТУ приведены следующие показатели и требования к ним: кажущаяся плотность – не менее 1,64 кг/дм³; прочность на сжатие – не менее 58,8 МПа; пористость – не более 21 %; содержание золы – не более 0,6 %; удельное электрическое сопротивление – (25-40) мкОм•м. При анализе фторного производства России было замечено, что срок службы многих коксовых пластин, удовлетворяющих требованиям ТУ, не является максимальным. Это свидетельствует о недостаточности числа показателей для оценки качества коксовых пластин, установленных этим ТУ. Поэтому исследования, направленные на разработку новых способов оценки качества коксовых пластин, являются актуальными. В связи с этим нами был проведен комплексный анализ качества коксовых пластин, выпускаемых зарубежными фирмами, с целью проверки возможности использования их при производстве фтора в России.

**Цель:** проведение анализов по определению физико-механических, химических и физико-химических характеристик коксовых пластин зарубежных фирм и установление их качества.

**Методы:** дифференциальный термический анализ, рентгеноструктурный анализ, атомно-эмиссионная спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, физико-механические и электрические методы анализа.

**Результаты.** Были определены: плотность, пористость, зольность, удельное электрическое сопротивление, прочность на сжатие коксовых пластин иностранных производителей, которые в основном удовлетворяют требованиям российского ТУ 48–12–34–95, но имеют и различия. Прочность на сжатие китайских пластин марки «HS» превосходит требования ТУ почти в 1,8 раз. Пористость и зольность японских пластин значительно ниже требований российского ТУ. В связи с этим провели электрическое содержание примесей в исследованных коксовых пластинах не превышает 0,5–0,6 мас. %, причем со-держание основной вредной примеси – серы – в образцах не превышает 0,1–0,3 %. Определили размеры пор и их распределение в пластинах с применением сканирующей электронной микроскопии. В целом для французских и китайских образцов характерны поры с размерами в интервала 2,9–117 мкм, для немецких образцов – с размерами менее 5,9 мкм. Почти 70 % пор японских образцов соответствуют трем интервалам: 2,9–5,9; 2,0–2,3 и 0,9–2,0 мкм. Анализом с использованием рентгеновских лучей установили, что материалы всех производителей имеют схожие дифракционные картины, кроме японских «GS-R», для которы х зарактерно наличие значительного количества углерода со структурой графита, определенных по положению рефлексов. Это, видимо, связано с различными усповиями процесса кристаллообразования проиесов, протекающих при нагревания и проеделили зарактеристики основных коксовых пластины на треванию установили, что материалы всех производителей имеют схожие дифракционные картины, кроме японских «GS-R», для которых характерно наличие с различными усповиями процесса кристаллообразования проиделенных по положению рефлексов. Это, видимо, связано с различными усповиями процесса кристаллообразования проиделении данных коксовых пластин. По результатам дифференциально-термического анализа определии характеристики основных процессов, протекающих при нагревании образцов косовых пластин в атмосфере воздуха, и провели их классификацию по термической стойкости.

#### Ключевые слова:

Коксовые пластины, механические характеристики, пористость, электрическое сопротивление, зольность, химический состав, дифференциальный термический анализ, сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, атомно-эмиссионный анализ.

#### Введение

Единственным промышленным способом получения фтора является электролиз фтороводорода из расплавов гидрофторидов калия системы KF·nHF. При этом в основном используют среднетемпературные ( $95\pm105$  °C) электролизеры с электролитом состава KF·2HF на силу тока от 5 до 40 кА. Электролизер является весьма сложным аппаратом, в котором решено множество проблем, связанных с агрессивностью сред фтора, фтороводорода и других фторидов.

Среднетемпературный электролизер, применяемый для производства фтора в промышленности, состоит из корпуса в виде прямоугольного параллелепипеда с параллельно расположенными в нем электролизными ячейками, системы подогрева (охлаждения), коксовых анодов, жалюзийных коробчатых катодов, газоразделительного колокола для раздельного сбора анодного газа (газообразного фтора) и катодного газа (водорода), а также других вспомогательных устройств (рис. 1). Анодными материалами являются кокс (для среднетемпературного процесса) и графит (для высокотемпературного). Недостатком коксовых анодов является их склонность к анодному эффекту и высокая чувствительность к влаге.



Рис. 1. Схема среднетемпературного электролизера: 1 – корпус; 2 – катод металлический; 3 – анод коксовый; 4 – колокол газоразделительный; 5 – элемент теплообменный; 6 – изоляторы

Fig. 1. Scheme of a medium-temperature electrolyzer: 1 is the casing; 2 is the metal cathode; 3 is the coke anode; 4 is the gasseparating campane; 5 is the heat exchange element; 6 are the insulators

В промышленности используют, преимущественно, аноды в виде пластин, медный токоподвод ввинчивают в коксовую пластину или скрепляют с ней при помощи болтов.

Срок службы анодного узла, как правило, определяет межремонтный период электролизера и обуславливает экономическую эффективность производства. Аноды выходят из строя вследствие нарушения контакта между коксовой пластиной и металлическими токоподводящими деталями, растрескивания коксового блока вдоль канала под шток, ввинченным в пластину, и разрушения коксовой пластины на границе электролит – анодный газ при неполном погружении ее в расплав. С течением времени происходит разрушение поверхности, осыпание и растрескивание анодного блока.

В связи с этим существует технологическая задача увеличения эксплуатационной стойкости анодов. Углерод имеет в зависимости от строения материала различную структуру: графит, сажа, кокс, алмаз и другие [1]. Для среднетемпературного электролиза наиболее устойчивой формой углерода, в которой он имеет разупорядоченную рентген-аморфную структуру, оказался кокс, поэтому эти пластины называют коксовыми [2]. Коксовые пластины (КП) получают в основном из нефтяного пиролизного малосернистого кокса определенного фракционного состава и каменноугольного пека. В последнее время качество коксовых пластин стало крайне низким: некоторые компоненты пластин были заменены на более дешевые, например, нефтяной пек – на каменноугольный. Качество КП российских производителей должно соответствовать требованиям ТУ 48-12-34-95 «Пластины коксовые обожженные». В ТУ приведены следующие показатели и требования к ним [3]: кажущаяся плотность – не менее 1,64 кг/дм<sup>3</sup>; прочность на сжатие – не менее 58,8 МПа; пористость – не более 21 %; содержание золы – не более 0,6 %; удельное электрическое сопротивление – (25–40) мкОм·м.

Опыт эксплуатации коксовых пластин, использованных в качестве анодов при производстве фтора на предприятиях СССР и России [4–6], показал недостаточность показателей качества, установленных ТУ 48–12–34–95, для однозначной оценки эксплуатационных свойств, и в первую очередь срока их службы. Кроме того, коксовые материалы иностранных поставщиков поступили на исследования с сертификатами качества, не соответствующими по ряду показателей требованиям российского ТУ.

Поэтому нами был проведен комплексный анализ качества КП, выпускаемых зарубежными фирмами, с целью проверки возможности использования их при производстве фтора в России.

#### Методики исследований и анализов

Исследования и анализы КП провели в соответствии с методиками, приведенными в работах [7–17]. В этих работах для определения качества пластин предлагают использовать методы физикомеханического, химического и физико-химического анализа, такие как ДТА, РСА, АЭС и СЭМ.

Химический состав коксовых пластин и золы определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа. Преимущество АЭС среди спектральных, физико-химических и других методов анализа заключается в возможности быстрого и бесконтактного обнаружения с высокой точностью множества элементов в широком диапазоне концентраций [11, 12]. Анализ проб пластин и зол проводили с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6200 DUO. Подготовку твердых проб пластин и зол проводили разложением в автоклавах системы микроволновой подготовки проб MARS-6 в смеси кислот. Для разложения использовали соляную кислоту (Ос.ч. «20–4» по ГОСТ 14261), азотную кислоту (Ос.ч. «24–4» по ГОСТ 11125), плавиковую кислоту (Ч. по ГОСТ 10484), перекись водорода («Медицинская» по ГОСТ 177). Для каждой серии проб готовили холостую пробу.

Диаметр пор КП определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии. Сканирующую электронную микроскопию можно использовать как для определения размеров и формы зерен, так и для определения химического состава веществ и визуализации неоднородности поверхности в пределах одного слоя [13, 14]. Исследование пор пластин проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа «Vega 3 SBH».

Контроль качества материала анодов фторных электролизеров с использованием метода дифференциально-термического анализа проводили в соответствии с методикой, приведенной и дополненной в работе [15] и успешно применяемой на ОАО «Ангарский электролизный химический комбинат», по следующим показателям окисляемости:

- показатель ∆А (%) убыль массы пробы до достижения максимума ДТГ-кривой дериватограммы;
- показатель В (%) отношение второго экстремума (в интервале температур 650-800 °С) к сумме интенсивностей обоих экстремумов на ДТГ дериватограмме;
- показатель ∆Т (°С) разность температур между первым и вторым экстремумами на ДТГ дериватограмме.

Показатели В и  $\Delta$ Т позволяют оценить содержание графитированных структур или содержание упорядоченной структурной модификации, показатель  $\Delta$ А – скорость и полноту окисления материала КП. По данным работы [16] максимальная наработка до отказа всех 100 % пластин достига-

ется при следующих значениях параметров ДТА:  $\Delta A \le 50$  %; B=0 %;  $\Delta T=0$  °C.

Расчет кажущейся энергии активации проводили по данным ТГ- и ДТГ-анализа.

Для исследования структуры и проведения входного контроля материала коксовых пластин нами было предложено комплексное использование метода PCA с данными по окисляемости, полученными при термогравиметрическом анализе пластин с помощью дериватографа. При этом для оценки КП использовали угол дифракции (угловые градусы), полуширину рефлексов (угловые градусы) и межплоскостное расстояние (Å).

Были проанализированы коксовые пластины следующих зарубежных фирм:

- «Carbon Group» (Германия), марка пластин «Sigrafine ABR» или «ABR-1»;
- 2) «SGL Carbon Group» (Франция), марка пластин «ABR-2»;
- «Nippon Techno Carbon Co» (Япония), марка пластин «GS-203R» (сокращенно «GS-R»);
- 4) «Anhui Tea & Exp.Co.Ltd» (Китай), марка пластин «CPC-02» (сокращенно «CPC»);
- 5) «Duranice Applied Materials (Dalian) Co. Ltd» (Китай), марка пластин «HS».

## Результаты исследований и анализов и их обсуждение

Характеристики КП, установленные ТУ 48–12–34–95. Кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, содержание золы, пористость и удельное электросопротивление материала коксовых пластин определяли по стандартным методикам [18–21]. Были проанализированы не менее трех пластин каждой марки, каждый анализ повторяли не менее трех раз. В табл. 1 приведены их средние значения, а также данные сертификатов поставщиков.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что пластины всех фирм, кроме «SGL Carbon Group» (Франция), достаточно однородны, об этом можно судить по незначительным изменениям их харак-

 Таблица 1.
 Технические характеристики коксовых пластин различных производителей

 Table 1.
 Technical characteristics of coke oven plates of different manufacturers

Марка пластин	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Зольность, %	Уд. электр. сопр., мкОм∙м	Прочн. на сж., МПа	Примечание	
Sort of plate	Density, g/cm <sup>3</sup>	Porosity, %	Ash content, %	Electrical resistance, $\mu\Omega \cdot m$	Compressive strength, MPa	Note	
	не менее	не более	не более	не более	не менее	ТУ	
-	not less than	not more than	not more than	not more than	not less than	48-12-34-95	
	1,64	21	0,6	25-40	58,8	РΦ	
ADD 1	$1,65{\pm}0,01$	$17,3{\pm}0,3$	$0,37{\pm}0,01$	$40,9{\pm}0,2$	$64,9{\pm}12,9$	Германия	
ABK-1	(1,60)	(15,3)	(0,4)	(46)	(95,9)	Germany	
	$1,71{\pm}0,05$	$13,0{\pm}2,5$	$0,45{\pm}0,03$	34,0±3,3	$75,0{\pm}10,0$	Франция	
ADR-2	(1,68)	(15,3)	(0,4)	(45)	(95,9)	France	
CC D	$1,75{\pm}0,02$	$23,0{\pm}0,3$	$0,07{\pm}0,03$	$23,3{\pm}1,2$	78,8±6,0	Япония	
GS-N	(1,81)	(-)	(-)	(25,5)	(59)	Japan	
CPC	$1,70 \pm 0,02$	$21,0\pm1,3$	$0,41{\pm}0,09$	(-)	$68,2{\pm}10,0$		
	(1,71)	(-)	(0,3)	(37,8)	(31,4)	Китай	
HS	$1,78{\pm}0,02$	$15,5{\pm}0,3$	$0,28{\pm}0,11$	32,0±0,3	$107,3\pm9,3$	China	
	(1,7)	(27)	(0,3)	(45)	(70)		

Примечание: В скобках указаны значения, приведенные в сертификатах.

Note: Values of quality standards are indicated in the parentheses.

теристик за исключением прочности. Колебания характеристик французских пластин (плотности, пористости, удельного электрического сопротивления) являются достаточно большими, что свидетельствует, видимо, о недостатке технологии их изготовления. Прочность пластин «Duranice Applied Materials (Dalian) Co. Ltd» (Китай) почти в 1,8 раза превышает требования российского ТУ, а зольность пластин «Nippon Techno Carbon Co» (Япония) – в 6 раз ниже данных требований.

*Химический состав.* Разложение исходных углей проводили в следующем порядке:

- каждую пробу угля тщательно перемешивали, формировали по две параллельные средние пробы из трех точек массой (0,25±0,02) г;
- 2) помещали навески угля в автоклавы, добавляли 7 см<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub> и 1 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, смывая уголь со стенок автоклавов. Оставляли пробы на 15 мин до окончания дымления. Закрывали автоклавы и помещали в микроволновую печь. Проводили нагрев при 220 °С и мощности 600 Вт в течение 20 мин (время подъема 15 мин); избыточное давление составило 3,5 МПа;
- 3) вскрывали автоклавы по окончании их охлаждения до 30 °С и добавляли 2 см<sup>3</sup> НF и 1 см<sup>3</sup> HCl. Проводили разложение при: 200 °С, время подъема 15 мин, время выдержки 15 мин, мощность 600 Вт. Избыточное давление составило 2,0 МПа;
- вскрывали остывшие автоклавы и добавляли 20 см<sup>3</sup> 4 % -ного раствора H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. Закрывали автоклавы и нагревали до 170 °С в течение 10 мин, время подъема 15 мин. Избыточное давление составило 0,9 МПа;
- 5) отфильтровывали пробы через фильтр «синяя лента».

Озоление проб КП проводили в муфельной печи при (815  $\pm$ 15) °С в течение 8 часов при скорости нагрева 6 °/мин. Растворение золы проводили в следующем порядке:

- отбирали навески из каждой пробы золы массой (0,10 ±0,02) г;
- 2) помещали навески зол в автоклавы, добавляли 5 см<sup>3</sup> HCl, 1,5 см<sup>3</sup> HF, 1 см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 2 см<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>. Оставляли пробы на 15 мин до окончания дымления. Закрывали автоклавы и помещали в микроволновую печь. Проводили разложение при 210 °С и мощности нагрева 600 Вт в течение 15 мин (время подъема 15 мин); избыточное давление составило 2,7 МПа;
- 3) вскрывали остывшие автоклавы и добавляли 20 см<sup>3</sup> 4% -го раствора Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub>. Закрывали автоклавы и нагревали до 170 °С в течение 10 мин (время подъема 15 мин). Избыточное давление составило 0,8 МПа;
- 4) отфильтровывали пробы через фильтр «синяя лента».

Для построения градуировочного графика использовали стандартные растворы («Скат», Новосибирск) МЭС-1, МЭС-2, МЭС-3, а также раствор серной кислоты ([S]=3208 мкг/см<sup>3</sup>). Во все пробы добавляли внутренний стандарт – раствор нитрата кадмия ([Cd]=0,5 г/дм<sup>3</sup>). Элементный анализ проводили в соответствии с методикой [22]. Результаты анализов для КП представлены в табл. 2, для зол – в табл. 3.

Таблица 2.	Содержание примесей в коксовых пластинах (с уче-
	том холостой пробы)

 Table 2.
 Content of impurity elements in coke plates (CP) (taking into account a blank sample)

Оксид элемента Element oxide	Содержание примесей в КП, мас. $\%$ Content of impurities in CP, wt. $\%$					
Liement oxide	ABR-1	ABR-2	GS-R	CPC	HS	
$Al_2O_3$	0,1026	0,1264	0,0197	0,0047	0,0920	
CaO	0,0749	0,1251	0,0791	0,0092	0,1188	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0826	0,1184	0,0493	0,0030	0,1318	
K <sub>2</sub> O	0,0169	0,0270	0,0027	0,0013	0,0200	
Na <sub>2</sub> O	0,0992	0,2336	0,0255	0,0043	0,1334	
$P_2O_5$	0,2752	0,1033	0,1116	0,0165	0,0447	
$SO_3$	0,7520	0,1458	0,0549	0,0192	0,3029	
$SiO_2$	0,1337	0,1729	0,0158	0,0049	1,0872	

Примечание:	Содержание	примесей	BaO,	MgO,	$MnO_2$ ,	SrO	и
ТіO2 по отдели	ьности не пре	вышало 0,0	007 ма	c.%.			

Note: Certain content of impurities BaO, MgO,  $MnO_2$ , SrO and  $TiO_2$  was less than 0,007 wt. %.

Таблица 3.Содержание примесей в золе (с учетом холостой пробы)Table 3.Content of impurity elements in ash (including a blank<br/>sample)

Оксид элемента Element oxide	Содержание примесей в золе, мас. % (состав пересчитан на массу исходного угля) Content of impurities in ash, wt. % (composition is recalculated for initial coal weight)				
	ABR-1	ABR-2	GS-R	CPC	HS
$Al_2O_3$	0,0843	0,1060	0,0191	0,0049	0,0769
CaO	0,0574	0,1185	0,0812	0,0073	0,1139
$Fe_2O_3$	0,0543	0,1277	0,0399	0,0036	0,0875
K <sub>2</sub> O	0,0159	0,0337	0,0018	0,0010	0,0107
Na <sub>2</sub> O	0,1227	0,2029	0,0162	0,0044	0,1065
$P_2O_5$	0,0064	0,0037	0,0030	0,0032	0,0179
$SO_3$	0,0357	0,0197	0,0210	0,0007	0,0107
$SiO_2$	0,1194	0,1542	0,0141	0,0047	0,9156

примечание: Сооержание примесеи ВаО, MgO, MnO<sub>2</sub>, SrO и TiO<sub>2</sub> по отдельности не превышало 0,006 мас.%.

Note: Certain content of impurities BaO, MgO, MnO<sub>2</sub>, SrO and  $TiO_2$  was less than 0,006 wt. %.

При проведении озоления происходят потери летучих оксидов серы и фосфора, в то же время озоление позволяет сконцентрировать элементы, содержание которых мало. В этой связи для более полной оценки количественного содержания примесей необходимо определять их содержание как в исходных углях, так и в получаемом при озолении продукте.

Суммарное содержание всех примесей в коксовых пластинах марки «ABR-1» не превышает 0,5-0,6 мас. %; в пластинах марки «ABR-2» – 0,6 мас. %; в пластинах марки «GS-R» – 0,43 мас. %; в пластинах марки «CPC» – 0,3 мас. %. Исключе-





Fig. 2. Pore size distribution



нием стали пластины марки «HS», в которых сум-

марное содержание всех примесей доходит до 1 %. Содержание основной вредной примеси серы в кок-

совых пластинах не превышает 0,27 мас. % (на

SO<sub>3</sub>), кроме пластин марок «ABR-1» и «HS», кото-

своем составе наименьшее количество примесей,

значение которых не превышает 0,01 мас. %, что

связано, видимо, с технологией их получения и ка-

чеством исходного сырья. В пробах разных партий

марки «ABR-1» наблюдается некоторая неодно-

родность по содержанию CaO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SO<sub>3</sub>, для

Коксовые пластины марки «СРС» содержат в

рые содержат серу до 0,76 мас. % (на SO<sub>3</sub>).

 $\partial - HS$ 

«ABR-2» – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O, а для проб марки «HS» – CaO,  $Fe_2O_3$ ,  $P_2O_5$  и SO<sub>3</sub>.

Исследование пор СЭМ. Распределения пор по размерам в виде дифференциальных гистограмм представлены на рис. 2. Для каждого образца получили не менее пяти снимков с внешней поверхности при различных увеличениях и провели не менее 500 измерений видимых пор. Примеры снимков поверхности образцов КП каждого поставщика при увеличении 55х (размер изображения 768×858) представлены на рис. 3.

Из фотографий поверхности, представленных на рис. 2, 3, видно, что большая часть размеров пор в образцах «ABR-1» находится в интервале от 0,7 до 406 мкм. На поверхности излома встречаются крупные поры размером до 440 мкм. Более 45 % размеров пор лежат в узком интервале от 0,6 до 2,0 мкм.

Для образца «ABR-2» характерно присутствие на внутренней поверхности пор, размер которых входит в интервал 2,9–117 мкм. Остальные размеры пор в незначительной степени распределены по интервалам 0,6–2,9 мкм.

Для образца «GS-R» не характерны поры с размерами более 117 мкм. При этом на диаграмме распределения пор по размерам присутствуют три основных максимума: 27 % пор входят в интервал размеров 0,9–2,0 мкм, 22 % – 2,0–2,3 мкм, 18 % – 2,9–5,9 мкм.

На поверхности образца «СРС» присутствуют З % пор с размерами менее 0,6 мкм, 48 % пор относительно равномерно распределены в интервале 2,9-21,0 мкм, 30 % пор входят в интервал 21-117 мкм и отсутствуют поры размерами более 406 мкм.

На поверхности образца «HS» присутствуют в основном поры размером от 2,9 до 117 мкм, при этом не обнаружены поры размером более 310 мкм. Для данной марки также характерно присутствие мелких пор менее 0,6 мкм.

Таким образом, для образцов «ABR-2», «HS» и «CPC» характерны поры с размерами в интервале 2,9–117 мкм, для образцов «ABR-1» – с размерами менее 5,9 мкм. Почти 70 % пор образца «GS-R» соответствуют трем интервалам: 2,9–5,9; 2,0–2,3 и 1,1–2,0 мкм.

Рентгеноструктурный анализ. Фазовый состав и структуру образцов изучали с помощью дифрактометра «ARL X'TRA» с использованием метода Дебая-Шеррера с фокусировкой по Брэггу-Брентано в автоматическом режиме работы прибора. Прибор оснащен трубкой с медным анодом (К $\alpha_1$ -излучение), детектором Пельтье с монокристаллом кремния. Напряжение рентгеновской трубки составляло 45 кВ, ток в трубке соответствовал 40 мА. Горизонтальная и вертикальная щели на трубке равнялись 2 и 4 мм соответственно, щели на детекторе – 0,5 и 0,2 мм. Расходимость падающего пучка рентгеновских лучей составляла 1,5422°, дифрагированного пучка – 0,6095° при разрешении 0,0441°. Рентгенограммы получали с шагом сканирования 0,02° и временем экспонирования в каждой точке, равным 1 с. Начальный угол задали равным 20°, конечный – 80°. На рис. 4 представлены дифрактограммы для исследованных и стандартных образцов. В табл. 4 представлены значения наиболее значимого дифракционного максимума для каждого образца.

Для «ABR-1» также характерны дифракционные рефлексы с углами 2 $\theta$ : 78,692°; 52,911°; 43,264°; для марки «ABR-2» – 78,045°; 53,238°; 42,671°; для марки «GS-R» – 77,4830°; 53,756°; 42,423°; для марки «CPC» – 77,173°; 53,350°; 43,689°; и для марки «HS» – 76,214°; 57,482°; 43,402°.

Таблица 4.	Результаты рентгеноструктурного анализа				
Table 1	Results of X-ray structural analysis				

			Интенсив-	Полуширина
	Угол дифрак-	Межплоско-	ность на полу-	рефлекса,
Марка	ции, угловые	CTHOP Dac-	высоте ре-	угловые
пластин	градусы	стояние. Å	флекса, имп/с	градусы
Sort of plate	Angle of dif- fraction, an- gular degrees	Interplanar distance, Å	Half-height in-	Half-width of
			tensity of the	the reflection
			reflection line,	line, angular
			imp/sec	degrees
ABR-1	$25,27{\pm}0,07$	$3,521{\pm}0,105$	$3962 \pm 114$	$6,074{\pm}0,600$
ABR-2	$25,38{\pm}0,06$	$3,516{\pm}0,131$	$3450{\pm}127$	$5,862{\pm}0,400$
GS-R	$26,03{\pm}0,08$	$3,420{\pm}0,120$	$17593{\pm}153$	$0,358{\pm}0,005$
CPC	$26,01{\pm}0,11$	$3,424{\pm}0,163$	$3900{\pm}184$	$0,023{\pm}0,003$
HS	$25,79{\pm}0,09$	$3,452{\pm}0,150$	$4060 \pm 176$	$0,020{\pm}0,002$

При идентификации кристаллической структуры и фазового состава с поиском по «Рентгенометрической картотеке» были определены три наиболее схожих с исследуемыми образцами материалов стандартных рефлекса для материалов кокса и графита:

- графит-2R (№ карточки 010-73-5918);
- графит-2Н (№ карточки 010-71-4630);
- карбон (кокс) (№ карточки 010-77-7164).

Из рентгенограмм, приведенных на рис. 4, следует, что материал коксовых пластин «ABR-1», «CPC», «HS» состоит в основном из кокса с включениями графита. Соотношение между фазами кокса и графита невозможно определить по данным PCA. Материалы пластин данных марок не имеют четко выраженных дифракционных максимумов, характерных для выбранных материалов (Графит-2H; Карбон) при  $2\theta$ :  $52-54^\circ$ ,  $76-79^\circ$  и  $82-84^\circ$ . Это свидетельствует о преобладании полимеризованных аморфных форм углерода, близких по строению к коксу.

Материалы пластин марки «GS-R» имеют интенсивные и ярко выраженные дифракционные максимумы, совпадающие с рефлексами стандартных материалов (2 $\theta$ ): 26,033–26,182°, 42,574–42,423°, 53,756–53,901° и 77,483–77,608°. Это связано с процессами кристаллообразования при изготовлении коксовых пластин и свидетельствует о преобладании в строении кристаллов менее полимеризованных форм углерода с упорядоченной структурой, близкой к графиту.

Дифференциальный термический анализ. Термогравиметрический анализ проб коксовых пластин проводили с помощью совмещенного термоанализатора SDT «Q600». В опытах анализировали пластины в количестве не менее трех штук каждой марки, нагрев образцов проводили до 900 °C со скоростью 10 °C в минуту. Результаты обработки ДТА представлены в табл. 5, пример дериватограммы – на рис. 5.

Оценку сортности КП проводили исходя из следующего [16]:

- класс качества 1: △А=50-55 %; В=0 %; △Т до 40 °С; количество экстремумов (n)=1,2;
- класс качества 2: ∆А=56-65 %; B=51-56 %; ∆T=41-60 °С; количество экстремумов (n)=2;



Рис. 4. Дифрактограммы: а) совместная для образцов «ABR-1», «ABR-2», «CPC» и «HS»; б) для образца «GS-R»; в) стандартные для кокса и графита

 $\label{eq:Fig.4.} \textit{ Diffraction patterns: a) simultaneous for the samples ~ (ABR-1), ~ (ABR-2), ~ (CPC) and ~ (HS); ~ (6) for the sample ~ (GS-R); ~ (6) for coke and graphite) and ~ (GS-R), ~ (6) for coke and graphite) and ~ (CPC) and ~ (CPC) and ~ (HS); ~ (6) for the sample ~ (GS-R); ~ (6) for coke and graphite) and ~ (GS-R); ~ (6) for the sample ~ (GS-R); ~$ 



Рис. 5. Дериватограмма коксовой пластины производства «СРС» (Китай)

Fig. 5. Derivational chart of coke plate produced by «CPC» (China)

- 3) класс качества 3: △А=66-70 %; B=57-60 %; △T=61-70 °С; количество экстремумов (n)=2;
- 4) класс качества 4: ∆А=более 70 %; B=61-70 %; ∆T=71-80 °С; количество экстремумов (n)=3.

Из данных, приведенных в табл. 5, следует, что качество коксовых пластин всех производителей в основном удовлетворяет требованиям фторного производства, и для оценки их качества достаточно определить количественно с помощью дифференциально-термического анализа изменение (убыль) массы образца (ТГ-кривая) при экстремальном значении максимума на ДТГ-кривой.

Для коксовых пластин марки «ABR-1» характерен один экстремум при 688–692 °С, убыль массы изменяется в пределах 46–49 %. На ДТГ-кривой, полученной для пластины марки «ABR-2», наблюдается два экстремума с изменением массы образца в пределах 27–29 и 62–69 %.

Results of the differential thermal analysis of coke plates

Mapкa пластин Sort of plate	A, %	B, %	ΔT, °C	Энергия активации, E <sub>a</sub> , кДж/моль [17] Activation energy, E <sub>a</sub> , kJ/mol	Класс качества (copr) Quality class (grade)
ABR-1	$46,24{\pm}3,24$	0	0	$46,\!95{\pm}4,\!47$	Ι
ABR-2	$27,09{\pm}2,87\\68,82{\pm}3,35$	$44,08{\pm}3,52$	$54,11\pm5,71$	$67,24{\pm}2,64$	II
GS-R	$64,21{\pm}1,33$	0	0	$82,25{\pm}3,01$	Ι
CPC	$23,95{\pm}2,02\\70,9{\pm}2,38$	$53,7{\pm}2,55$	$69,\!36{\pm}4,\!56$	$63,02{\pm}2,72$	III
HS	$43,68 \pm 1,90$	0	0	$\overline{64,\!39}{\pm}8,\!85$	Ι

Таблица 5. Результаты ДТА коксовых пластин

Table 5.

На ДТГ-кривой, полученной при анализе пластин марки «GS-R», имеется лишь один экстремум, появляющийся в интервале 815-838 °C, то есть при более высокой температуре, чем у пластин всех других производителей. При этом изменение массы, отвечающее максимуму экстремума на ДТГ-кривых, соответствует (64,21±1,33) %.

Полученные результаты можно объяснить другим составом: пластины данной марки состоят в основном из термически более устойчивой фазы – графита, который окисляется при более высокой температуре, и для этого требуется большее значение энергии активации.

На ДТГ-кривых коксовых пластин марки «СРС» имеются два экстремума при 652–667 и 717–728 °С, соответственно. При этом показатель  $\Delta A$  равен (23,95±2,02) и (70,9±2,38) %; разность температур между максимумами – 54–72 °С, поэтому эти пластины следует отнести к III классу качества и их не следует использовать для изготовления анодов.

Для коксовых пластин марки «HS» характерен один экстремум при 660–675 °С. Для двух образцов из шести имеются два экстремума при нечетком разрешении; второй экстремум обнаружен при температуре 703–708 °С. При этом изменение массы в точке максимума первого экстремума варьируется в пределах 40–46 %, второго – 80–84 %; разность температур между экстремумами для двух проб – 41,7–41,9 °С. Четыре из шести исследованных пластин марки «HS» были отнесены к I сорту, две – ко II сорту.

Таким образом, исследованные образцы пластин марки «ABR-2» относятся ко II сорту, образ-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Сырьевая база и перспективы производства фтора в России / В.Л. Софронов, О.Г. Жеронкина, К.В. Холина и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 114–123. цы марки «СРС» – к III сорту, а остальные образцы пластин относятся к I сорту. Коксовые пластины I и II сорта следует использовать для изготовления анодов и дальнейшей проверки их эксплуатационных характеристик в опытных условиях производства фтора.

#### Заключение

Были исследованы характеристики коксовых пластин, произведенных иностранными фирмами «Carbon Group» (Германия – марка «ABR-1» и Франция – марка «ABR-2»), «Nippon Techno Carbon» (Япония – марка «GS-203R»), «Anhui Tea & Exp.Co.Ltd» (Китай – марка «СРС») и «Duranice Applied Materials (Dalian) Co. Ltd» (Китай – марка «HS») с целью проверки возможности их использования для изготовления анодов для фторных электролизеров. По результатам определения таких показателей, как плотность, пористость, зольность, удельное электрическое сопротивление, прочность на сжатие, коксовые пластины зарубежных фирм в основном соответствуют требованиям российского ТУ 48-12-34-95. Несколько повышенная величина пористости относительно требований ТУ получена для пластин марки «GS-R».

Содержание основной вредной примеси серы в исследованных образцах коксовых пластин не превышает 0,27 мас. % (на  $SO_3$ ), кроме пластин марок «ABR-1» и «HS», которые содержат серу до 0,76 мас. % (на  $SO_3$ ).

По результатам ДТА проведена классификация коксовых пластин по сортам: к I сорту отнесены пластины «ABR-1», «GS-R» и четыре из шести пластин марки «HS»; ко II сорту: пластины «ABR-2» и две из шести пластин марки «HS», к III сорту – пластины марки «CPC».

По результатам PCA установлено, что коксовые пластины марок «ABR-1», «ABR-2», «CPC» и «HS» состоят в основном из кокса, а пластины марки «GS-R» из графита. Поэтому последние, видимо, не пригодны для производства анодов, несмотря на результаты ДТА, согласно которому они были отнесены к первому сорту.

Таким образом, для определения качества коксовых (углеродных) пластин, пригодных для изготовления анодов фторного производства, требуется их комплексная оценка с использованием показателей, установленных ТУ 48–12–34–95, а также данных дифференциально-термического и рентгеноструктурного анализов. Результаты работы будут использованы в дальнейшем при проверке анодных материалов в опытных условиях производства фтора.

- Дмитрева Г.В. Стойкость анодов в процессе электролитического получения фтора // Цветная металлургия. – 1967. – № 23. – С. 39–45.
- ТУ 48-12-34-95. Пластины коксовые обожжённые. Технические условия. – М.: Стандартформ, 2008. – 11 с.

- Зусайлов Ю.Н., Бадеников В.Я. Зависимость межремонтной наработки серийных фторных электролизёров от физико-химических свойств анодного материала // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 72–75.
- Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – V. 5. – № 8. – P. 546–568.
- Зусайлов Ю.Н., Бадеников В.Я. Увеличение эксплуатационной стойкости анодов и оптимизация работы серийных фторных электролизёров // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 1. С. 87–91.
- Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine // Journal of the Electrochemical Society of Japan – 1961. – V. 29. – P. 180–186.
- Bai L., Conway B.E. Electrochemistry of anodic fluorine gas evolution at carbon electrodes: Part III. Characterization of activated carbon anodes following onset of the «anode effect» // Journal of Applied Electrochemistry. 1990. V. 20. № 6. P. 925-931.
- Quality of anode. Overview of Problems and Some Methods of their Solution / S.G. Shahrai, N.A. Sharypov, U.G. Mikhalev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V. 12. – № 19. – P. 8976–8985.
- Role of the Surface Properties of Carbon Anodes in the Electrolytic Preparation of Fluorine / F. Lantelme, H. Groult, C. Belhomme, B. Morel, F. Nicolas // Journal of New Materials for Electrochemical Systems. - 2006. - V. 9. - Iss. 3. - P. 283-290.
- Moore G.L. Introduction to Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. - Amsterdam: Elsevier Publ., 1989. -340 p.
- Robinson J.W. Atomic Spectroscopy. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and expanded. - N.Y.: CRC Press Publ., 1996. - 384 p.

- Scanning electron microscope VEGA3. Instructions for use. Czech Republic, Tescan, 2013. – 50 p.
- 14. Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. Electron Microscopy and Analysis.  $3^{\rm rd}$  ed. N.Y.: CRC Press, 2000. 254 p.
- Зусайлов Ю.Н., Бадеников В.Я. Оптимизация работы серийных фторных электролизёров на основе анализа электродных материалов и электролита // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 19–24.
- 16. Зусайлов Ю.Н., Бадеников В.Я. Результаты испытаний контрольных анодов в серийных фторных электролизёрах и разработка дополнительных показателей качества анодного материала // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 1. С. 76–79.
- 17. Лавренова Е.А., Жеронкина О.Г., Софронов В.Л. Дериватографическое исследование качества угольных анодов, используемых для производства фтора // Химия фтора: материалы Х Всероссийской конференции, приуроченной к 100-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Ю.В. Гагаринского / под ред. В.М. Бузник. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 50.
- ГОСТ 23775-79. Изделия углеродные. Методы определения предела прочности на сжатие, изгиб, разрыв. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 12 с.
- ГОСТ 22692–77. Материалы углеродные. Методы определения зольности. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 3 с.
- ГОСТ 22898-78. Коксы нефтяные малосернистые. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 14 с.
- ГОСТ 23776-79. Изделия углеродные. Метод измерения удельного электрического сопротивления. М.: Изд-во стандартов, 2018. – 16 с.
- ГОСТ 54237. Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. – М.: Стандартнформ, 2018. – 12 с.

Поступила 22.10.2018 г.

## Информация об авторах

Софронов В.Л., доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

*Молоков П.Б.*, кандидат технических наук, заведующий кафедрой химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

*Муслимова А.В.*, старший преподаватель кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Полянская А.В., студентка кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Дамм Ю.П., ведущий специалист технологического отдела Сублиматного завода АО «Сибирский химический комбинат».

Рудников А.И., главный инженер Сублиматного завода АО «Сибирский химический комбинат».

UDC 661.481.7

## ANALYSIS OF CARBON MATERIALS USED AS ANODES IN FLUORINE PRODUCTION

Vladimir L. Sofronov<sup>1</sup>,

EVLSofronov@mephi.ru

## Petr B. Molokov<sup>1</sup>,

PBMolokov@mephi.ru

Alexandra V. Muslimova<sup>1</sup>, klameri7@gmail.com

Anna V. Polyanskaya<sup>1</sup>,

AVPolyanskaya@mail.ru

Yuri P. Damm<sup>2</sup>,

damm\_u\_p@mail2000.ru

## Andrey I. Rudnikov<sup>2</sup>,

Rudnikov.a.i@yandex.ru

- Seversk Technological Institute branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
   65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russia.
- <sup>2</sup> JSC «Siberian Group of Chemical Enterprises»,

1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russia.

The relevance. Electrolysis of hydrogen fluoride of potassium difluoride molten KF-nHF system is the only industrial method for obtaining fluorine. In this case, medium-temperature (95–105 °C) electrolyzers with an electrolyte of KF-2HF composition with a current strength of 5 to 40 kA are mainly used. The electrolyzer is a very complex device, but many problems associated with the corrosivity of fluorine, hydrogen fluoride and other fluoride environments have been already solved. At the same time, there is a technological challenge to increase the service life of anodes made of carbon plates. Carbon has various forms depending on the structure of the material: graphite, soot, coke, diamond and others. The most stable carbon form for electrolysis of medium flowing at 95±105 °C was coke, wherein the carbon has a disordered X-ray-amorphous structure, so these plates called coke. Coke plates are obtained mainly from petroleum pyrolysis low-sulfur coke of a certain fractional composition and coal tar pitch. Recently, coke plates have become of extremely poor quality. Some components of the plates were replaced by cheaper ones, for example, oil pitch was replaced by coal tar. The quality of the coke plates produced by Russian manufacturers must meet the requirements of Technical Specifications (TS) 48-12-34-95 «Coke burned plates». TS establish the following indicators and requirements for them: apparent density - not less than 1,64 kg/dm<sup>3</sup>; compressive strength - not less than 58,8 MPa; porosity - no more than 21 %; ash content is not more than 0,6 %; the specific electrical resistance is  $(25-40) \mu Om m$ . In the analysis of fluorine production in Russia, it was noted that the life of many coke plates that meet the requirements specifications is not the maximum. This testifies that the indicators set by this specification are not enough to assess the quality of a coke plate. Therefore, research for development of new quality tests of coke plates is relevant. Due to this we carried out a comprehensive analysis of the quality of coke plates produced by foreign companies in order to test the possibility of using them in fluorine production in Russia.

**The main aim** is to analyze physical-mechanical, chemical and physicochemical properties of coke plates made by foreign firms and their quality.

**Methods:** differential thermal analysis, X-ray structural analysis, atomic emission spectroscopy, scanning electron microscopy, physicalmechanical and electrical methods of analysis.

**Results.** The authors have determined density, porosity, ash content, specific resistance, compressive strength of coke-oven plates of foreign manufacturers, which basically meet the requirements of TS 48-12-34-95. However, they differ. The compressive strength of Chinese plates of the «HS» mark exceeds the requirements of TS by almost 1,8 times. The porosity and ash content of Japanese plates are much lower than the requirements of TS. The elemental analysis of plates by atomic-emission spectroscopy method was carried out and it was established that the chemical compositions of coke plates are close. The total content of impurities in the investigated coke plates does not exceed 0,5-0,6 wt. %, the content of the main harmful sulfur impurity in the samples being not more than 0,1-0,3 %. The size of pores and their distribution in the plates were determined by scanning electron microscopy. In general, French and Chinese samples are characterized by pores with dimension in the range of  $2,9-117 \,\mu$ m. German samples are characterized by pore size which is less than  $5,9 \,\mu$ m. Almost 70 % of pores of Japanese samples correspond to three intervals: 2,9-5,9; 2,0-2,3 and  $0,9-2,0 \,\mu$ m. X-ray diffraction analyses show that materials of all manufacturers have similar diffraction patterns, except for the samples of Japanese «GS-R», which are characterized by the presence of a significant amount of carbon with a graphite structure, determined by the position of the reflexes. This is obviously due to the various conditions of crystal formation in production of these coke plates. According to the results of differential thermal analysis, the authors determined the characteristics of the main processes occurring during heating the coke plates in the air. The coke plates we classified as well according to thermal stability.

#### Key words:

Coke plates, mechanical data, porosity, electrical resistance, ash content, chemical composition,

differential thermal analysis, scanning electron microscopy, X-ray structural analysis, atomic emission analysis.

#### REFERENCES

- Sofronov V.L., Geronkina O.G., Kholina K.V. Syrevaya baza i perspektivy proizvodstva ftora v Rossii [Raw material base and prospects for fluoride production in Russia]. *Izvestiya vysshykh* uchebnykh zavedeniy. Fizika, 2013, vol. 56, no. 4/2, pp. 114–123.
- Dmitreva G.V. Anode stability in the process of electrolytic fluoride production. *Tsvetnaya metalurgiya*, 1967, no. 23, pp. 39–45. In Rus.
- TU 48-12-34-95. Plastiny koksovye obozhenye. Tekhnicheskie uslovia [Technical conditions 48-12-34-95. Coke baked plates. Technical Specifications]. Moscow, Standartform Publ., 2008. 11 p.
- 4. Zusajlov Yu.N., Badenikov V.Ya. Dependence of operating time of serial fluorine electrolyzers during the overhaul on physical and chemical properties of the anode material. *Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 72–75. In Rus.
- Sadler B.A. Critical issues in anode production and quality to avoid anode performance problems *Journal of Siberian Federal* University. Engineering & Technologies, 2015, vol. 5, no. 8, pp. 546-568.
- Zusaylov Yu.N., Badenikov V.Ya. Increasing the service life of anodes and optimizing the operation of serial fluorine electrolyzers. *Collection of scientific works of the Angarsk State Technical University*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 87–91. In Rus.
- Watanabe N., Ishii Y., Yoshizawa S. Studies on the preparation of fluorine and its compounds. III Relation between the wettability of anode and the anodic polarization in the electrolytic generation of fluorine. *Journal of the Electrochemical Society of Japan*, 1961, vol. 29, pp. 180–186.
- Bai L., Conway B.E. Electrochemistry of anodic fluorine gas evolution at carbon electrodes: Part III. Characterization of activated carbon anodes following onset of the «anode effect». *Journal of Applied Electrochemistry*, 1990, vol. 20, no. 6, pp. 925–931.
- Shahrai S.G., Sharypov N.A., Mikhalev U.G. Quality of anode. Overview of Problems and Some Methods of their Solution. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 19, pp. 8976–8985.
- Lantelme F., Groult H., Belhomme C., Morel B., Nicolas F. Role of the Surface Properties of Carbon Anodes in the Electrolytic Preparation of Fluorine. *Journal of New Materials for Elec*trochemical Systems, 2006, vol. 9, Iss. 3, pp. 283–290.
- Moore G.L. Introduction to Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. Amsterdam, Elsevier, 1989. 340 p.
- Robinson J.W. Atomic Spectroscopy. 2<sup>nd</sup> ed., rev. and expanded. New York, CRC Press, 1996. 384 p.
- Scanning electron microscope VEGA3. Instructions for use. Czech Republic, Tescan, 2013. 50 p.

- Goodhew P.J., Humphreys J., Beanland R. Electron Microscopy and Analysis. <sup>3rd</sup> ed. N.Y., CRC Press, 2000. 254 p.
- Zusaylov Yu.N., Badenikov V.Ya. Optimization of operation of serial fluorine electrolyzers based on the analysis of the anode material of the electrolyte. *Vestnik of the Irkutsk State Technical University*, 2006, vol. 26, no. 2–1, pp. 19–24. In Rus.
- 16. Zusaylov Yu.N., Badenikov V.Ya. Results of tests of control anodes in serial fluorine electrolysers and development of additional indicators of the quality of anode material. *Collection of scientific* works of the Angarsk State Technical University, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 76–79. In Rus.
- 17. Lavrenova E.A., Zheronkina O.G., Sofronov V.L. Derivatograficheskoe issledovanie kachestva ugolnykh anodov, ispolzuemykh dlya proizvodstva ftora [Derivatographic study of the quality of carbon anodes used for fluorine production]. Khimiya ftora. Materialy X vserossiyskoy konferentsii, priurochennoy k 100-letiyu so dnya rozhdeniya chlen-korrespondenta AN SSSR Yu.V. Gagarinskogo [Fluorine Chemistry. Proc. of the 10<sup>th</sup> All-Russian conference timed to the centenary of the birth of Yu.V. Gagarinsky, corresponding member of the USSR academy of sciences]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. pp 50.
- GOST 23775-79. Izdeliya uglerodnye. Metody opredeleniya predela prochnosti na szhatie, izgib, razryv [State Standard 23775-79. Carbon articles. Methods for determining the ultimate compressive strength, bending, fracture]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2018. 12 p.
- GOST 22692-77. Materialy uglerodnye. Metody opredeleniya zolnosti [State Standard 22692-77. Carbon materials. Methods for determination of ash content]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2018. 3 p.
- GOST 22898-78. Koksy neftyanye malosernistye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 22898-78. Low-sulfur petroleum cokes. Technical specifications]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2018. 14 p.
- GOST 23776-79. Izdeliya uglerodnye. Metod izmereniya udelnogo elektricheskogo soprotivleniya [State Standard 23776-79. Carbon articles. The method of measuring the electrical resistivity]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2018. 16 p.
- 22. GOST 54237. Toplivo tverdoe mineralnoe. Opredelenie khimicheskogo sostava zoly metodom atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy [State Standard 54237. Solid mineral fuel. Determination of ash chemical composition by atomicemission spectrometry with inductively coupled plasma]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p.

Received: 22 October 2018.

#### Information about the authors

*Vladimir L. Sofronov*, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

*Petr B. Molokov*, Cand. Sc., head of the Department of Chemistry and Technology of Modern Energetics Materials, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

*Alexandra V. Muslimova*, senior lecturer, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

Anna V. Polyanskaya, student, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

Yuri P. Damm, leading specialist, Sublimate plant of JSC «Siberian Group of Chemical Enterprises».

Andrey I. Rudnikov, chief engineer, Sublimate Plant of JSC «Siberian Group of Chemical Enterprises».

#### УДК 621.644

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ПИЛОТНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ

## Саруев Лев Алексеевич<sup>1</sup>,

saruevla@tpu.ru

## Шадрина Анастасия Викторовна<sup>1</sup>,

avshadrina@rambler.ru

Саруев Алексей Львович<sup>1</sup>,

saruev@tpu.ru

### Васенин Сергей Сергеевич<sup>2</sup>,

vasenin8@gmail.com

#### Пахарев Александр Владимирович<sup>3</sup>,

avpaharev@tpu.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> АО «Газпромнефть Московский НПЗ», Россия, 109429, г. Москва, Капотня, 2 квартал, 1, корп. 3.
- <sup>3</sup> ООО «Геотехновация», Россия, 634057, г. Томск, ул. 79-й Гвардейской дивизии, 4/5.

**Актуальность.** В процессе реализации технологии горизонтально-направленного бурения скважин нередко возникают проблемы, связанные с необходимостью преодоления включений или горных пород высокой твердости, что требует использования рационального способа разрушения их ударом. Однако существующие ударные механизмы современных буровых установок формируют силовые импульсы нерациональной формы, не учитывающей свойства горной породы к сопротивлению для её разрушения. Такая форма силовых импульсов и кратковременность их воздействия на горную породу снижает глубину внедрения в нее коронки, формируя волну растяжения, разрушающую буровой инструмент, прежде всего соединения бурильных труб. В связи с этим возникла необходимость в научном обосновании и разработке принципиально нового формирователя силовых импульсов, соответствующих процессу сопротивления горной породы внедрению в нее породоразрушающего инструмента, а также резьбовых соединений бурильных труб, учитывающих волновой характер распространения силовых импульсов в бурильной колонне. **Цель:** научное обоснование и разработка принципиально нового формирователя силовы колонне колонне. учитывающего характер изменения сопротивления внедрению в пового формирователя иловых импульсов колонне. учитывающего характер изменения сопротивления внедрению пового формирователя силовых импульсов в бурильной колонне. от заботка принципиально нового формирователя иструмента в грунт, и новой конструкции резьбовых соединений бурильных труб, учитывающей волновой характер распространения через них энергии силовых импульсов конструкции резьбовых соединений бурильных труб, учитывающей волновой характер распространения через них энергии силовых импульсов на забой применительно к бурению пилотной скважины при бестраншейной прокладке трубопроводов.

**Объекты:** технология и техника процесса горизонтально-направленного бурения пилотных скважин с использованием энергии силовых импульсов, распространяющихся по бурильной колонне.

**Методы:** обобщение и анализ научно-технической информации; методы теоретической и прикладной механики; тензометрирование процессов передачи упругих волн деформаций на стенде, имитирующем искусственные скважины; математическое моделирование работы системы формирования силовых импульсов и процесса распространения их через резьбовые соединения бурильной колонны.

**Результаты.** Приведен обзор способов бестраншейной прокладки трубопроводов. Определены перспективы совершенствования технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин как начального этапа технологии бестраншейной прокладки трубопроводов. Предложены технические решения по совершенствованию технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин, обеспечивающих существенное увеличение механической скорости проходки скважины.

#### Ключевые слова:

Горизонтально-направленное бурение, установка, гидравлическая система, колонна бурильных труб, соединение бурильных труб, силовой импульс.

#### Введение

Анализ тенденций развития технологий бестраншейной прокладки трубопроводов показал, что к настоящему времени в мире накоплен огромный опыт прокладки трубопроводов и коммуникаций как управляемыми, так и неуправляемыми установками [1–10]. Актуальность и перспективность способа бестраншейной прокладки трубопроводов определяет значительный научный интерес к данному направлению. Так, например, в Институте горного дела Сибирского отделения Российской академии наук разработана классификация способов сооружения скважин, учитывающая специфику прокладки подземных каналов в грунте и способствующая синтезу новых технологий и технических средств [1, 11].

Неуправляемый метод основан на горизонтальном прямолинейном внедрении трубопроводов за счет статического или ударного воздействия. Одним из первых и простых бестраншейных технологий стал метод прокола: первоначально представлявший механический способ разрушения, а впоследствии усовершенствованный и использующий энергию струи воды для размыва грунта перед породоразрушающим инструментом [12, 13] или другой вариант реализации, – с применением источника продольно-направленных колебаний – вибромолоты [14].

Кроме того, в технологии прокола используют пневмопробойник – самодвижущуюся пневматическую машину ударного действия [15].

Область применения технологии прокола имеет ряд недостатков и ограничений по максимальному диаметру 500 мм и длине до 100 м.

Управляемый метод прокладки трубопроводов бестраншейными технологиями основан на использовании буровых установок горизонтальнонаправленного бурения. Прокладка подземных трубопроводов по технологии горизонтально-направленного бурения выполняется в несколько этапов: бурение пилотной скважины, последовательное её расширение и протягивание трубопровода.

Сооружение скважин в грунте бурением широко используется как в мировой практике подземного строительства, так и в отечественном производстве.

Поиск технических решений (гидроударное бурение; бурение скважин с частичной экскавацией грунта; пневмопробойники для сооружения скважин в грунте; применение пневмомолотов) и исследовательский опыт приводят к выводу, что более перспективным является бурение, сопровождаемое разрушением и удалением значительной части грунта из скважины [1, 7, 16].

Как правило, установки для механического бурения имеют породоразрушающий инструмент вращательного действия [12]. К недостаткам таких буровых установок можно отнести низкую эффективность работы при встрече с твердыми горными породами или другими труднопреодолимыми препятствиями.

## Перспектива развития технологии горизонтально-направленного бурения при бестраншейной прокладке трубопроводов

В процессе реализации технологии горизонтально-направленного бурения скважин нередко возникают проблемы, когда на планируемой траектории бурения пилотной скважины встречаются включения с высокой твердостью. Поэтому в ряде развитых стран для горизонтально-направленного бурения были созданы установки, оснащенные достаточно мощными гидравлическими ударными механизмами [5, 13], которые формировали в бурильной колонне силовые импульсы, распространяющиеся по ней со скоростью звука к породоразрушающему инструменту и, разрушив встреченное в грунте включение с высокой твердостью, позволяли беспрепятственно продолжать бурение скважины. Но одновременно возникла другая проблема, связанная с резким снижением долговечности резьбовых соединений труб бурильной колонны, поскольку бойки ударных механизмов формировали силовые импульсы с крутым передним фронтом. Такая форма силовых импульсов и кратковременность их воздействия на горную породу снижает глубину внедрения в нее коронки [17]. При этом значительная часть переднего фронта волны деформации сжатия, не встречая достаточного сопротивления в начале процесса внедрения коронки в горную породу, отражается и распространяется обратно по бурильной колонне волной растяжения, которая является основной причиной разрушения резьбовых соединений в бурильной колонне.

В результате возникла необходимость в научном обосновании и разработке принципиально нового формирователя силовых импульсов, соответствующих процессу сопротивления горной породы внедрению в нее породоразрушающего инструмента. Кроме того, следует отметить, что существующие конструкции резьбовых соединений бурильных труб не учитывают волновой характер воздействия распространяющихся по колонне силовых импульсов [18, 19]. В частности, резьбовое соединение «труба в трубу» всегда имеет изменения поперечного соединения, что вызывает отражения силовых импульсов, а следовательно, существенную потерю их энергии, передаваемой по бурильной колонне к породоразрушающему инструменту. В случае соединения труб муфтами отражения силовых импульсов возникают в результате контактного взаимодействия витков резьбы муфт и бурильных труб. Имея больший диаметр по отношению к соединяемым трубам, муфты сравнительно быстрее изнашиваются при вращении колонны в процессе бурения скважин, что снижает их прочность.

Для решения отмеченных проблем совершенствования технологии и техники горизонтальнонаправленного бурения пилотных скважин как начального этапа бестраншейной прокладки трубопроводов необходимо научное обоснование и разработка как принципиально нового формирователя силовых импульсов в бурильной колонне, учитывающего характер изменения сопротивления внедрению породоразрушающего инструмента в грунт, так и новой конструкции резьбовых соединений бурильных труб, учитывающей волновой характер распространения через них энергии силовых импульсов на забой скважины.

#### Гидравлическая система формирования силовых импульсов

Обзор и анализ технической литературы по вопросам разработки установок горизонтально-направленного бурения показал, что в настоящее время достаточно хорошо разработаны теоретические основы методики их проектирования. Данные разработки способствовали созданию совершенных конструкций машин ударного действия. Вместе с тем стоит отметить, что пневматические ударные механизмы имеют низкий КПД по отношению к гидравлическим или электрическим. Электроударные машины имеют ряд существенных ограничений, из-за которых проблема создания мощных электроударных машин на сегодняшний день не решена в полной мере. Представленное в работе [18] техническое решение по формированию импульсов, направленных на разрушение горной породы, позволяет увеличить КПД буровых установок по сравнению с аналогами. Однако предложенная система имеет несовершенную конструкцию гидроцилиндра, потери давления масла в гидроцилиндре из-за возможности его утечек в сопряжении с поршнем влияют на мощность и КПД установки.



- Рис. 1. Ударный механизм установки ударно-вращательного бурения: 1 гидропульсатор; 2 привод; 3 плунжер; 4 гидравлический цилиндр; 5 упругий элемент; 6 сильфон; 7 защитный корпус; 8 пружина; 9 инерционная масса; 10 силовой гидроцилиндр; 11 подпружиненный поршень; 12 хвостовик колонны бурильных труб; 13 колонна бурильных труб
- Fig. 1. Percussion mechanism of percussion rotary drilling rigs: 1 is the hammerless hydraulic power pulse generator; 2 is the drive; 3 is the plunger; 4 is the hydraulic cylinder; 5 is the elastic element; 6 is the bellow; 7 is the container housing; 8 is the spring; 9 is the inertial mass; 10 is the hydraulic power cylinder; 11 is the spring-loaded piston; 12 is the shank of the drill string; 13 is the drill string

Разработанная и усовершенствованная авторами конструкция системы формирования силовых импульсов представляет из себя ударный механизм установки ударно-вращательного бурения, содержащий гидравлически соединенные между собой гидропульсатор – 1 с приводом – 2, плунжер – 3, расположенный в гидравлическом цилиндре – 4. Полости гидравлического цилиндра соединены с полостью сильфона – 6. Пружина – 8 в защитном корпусе – 7 опирается на подпружиненную инерционную массу – 9, размещенную на торце силового гидроцилиндра – 10 и соединенного с полостью сильфона – 6. Сильфон – 6 жестко соединен с подпружиненным поршнем – 11, опирающимся на хвостовик – 12 колонны бурильных труб – 13 (рис. 1) [20–23].

Плунжер – 3, приводимый в действие пульсатором, совершает возвратно-поступательные движения в гидравлическом цилиндре, которые, в свою очередь, формируют импульсы давления с плавно нарастающим передним фронтом. Последние приводят к колебаниям жидкости в упругом элементе. Сформированный таким образом силовой гидравлический импульс передается в сильфон – 6 и, воздействуя на подпружиненный поршень – 11 через хвостовик – 12, по бурильной колонне – 13 передается к породоразрушающему инструменту [18, 20, 21].

Следует отметить, что в данной конструкции заложено автоматическое регулирование силовых импульсов. В процессе бурения в породах слабой крепости амплитуда формируемых силовых импульсов будет небольшой, т. к. на пути породоразрушающего инструмента не будет большого сопротивления породы. Но при появлении на пути породоразрушающего инструмента предметов или горной породы высокой твердости силовой импульс, сформированный плунжерной парой, будет иметь большую амплитуду и обеспечит необходимую мощность для преодоления препятствия.

#### Решение проблемы обеспечения эффективной передачи энергии силовых импульсов по бурильной колонне

В процессе ударно-вращательного бурения пилотных скважин малого диаметра соединения бурильных труб нагружены осевым усилием подачи, крутящим моментом и силовыми импульсами. Представление о воздействии сложных силовых нагрузок на резьбовое соединение при проектировании бурильных колонн позволяет повысить долговечность резьбовых соединений [19].

На практике доказано, что поломка резьбовых соединений при бурении ударно-вращательным способом происходит вследствие нагружения несовершенных конструкций резьбовых соединений силовыми импульсами [22]. Последнее приводит к увеличению затрат ресурсов (стали, времени и т. п.), представляет для практики бурения существенную проблему и требует решения путем разработки конструкции соединения труб, учитывающей особенности нагружения соединения в процессе эксплуатации и, как следствие, обладающей повышенной работоспособностью.

При прохождении силовых импульсов по бурильной колонне форма волны деформации изменяется, а энергия частично рассеивается. Обзор научных литературных источников показал, что надежность работы соединения труб возможно увеличить, снижая долю рассеянной в нем энергии, связанной с трением витков резьбы [22].

На сегодняшний день в технологии горизонтально-направленного бурения пилотных скважин малого диаметра применяют трубы с высаженными концами вовнутрь и резьбовым соединением «труба в трубу» (рис. 2).



**Рис. 2.** Бурильная труба с резьбовым соединением «труба в трубу»

#### Fig. 2. Drill pipe with pipe-to-pipe thread joint

Выполненные авторами [19] теоретические и экспериментальные исследования позволили определить наиболее эффективную конструкцию резьбового соединения бурильных труб [24].

Предложенное на основе этих исследований ниппельное соединение (рис. 3) включает бурильные трубы и ниппель – соединительный элемент, расположенный внутри труб. Трубы имеют внутреннюю круглую цилиндрическую резьбу. Ниппель представляет конструкцию с внешней резьбой, центрирующим буртиком и проточками.



- Рис. 3. Ниппельное соединение бурильных труб: 1, 2 бурильные трубы; 3, 4 – проточки; 5 – ниппель; 6 – центрирующий буртик; 7 – кольцевые проточки; 8 – упругие пластины; 9 – буртик со скошенной передней гранью; 10 – кольцевая проточка; 11 – конусная проточка; 12 – лыски под ключ
- Fig. 3. Nipple joint of drill pipes: 1, 2 are the drill pipes; 3, 4 are the faces; 5 is the nipple; 6 is the centralizing collar; 7 are the circular faces; 8 are the elastic plates; 9 is the collar; 10 is the circular face; 11 is the tapered face; 12 is the flattened surface

Одним из важных технических решений предлагаемого соединения бурильных труб является наличие устройства для нежесткой фиксации ниппеля в одной из соединяемых труб. Это необходимо при автоматизации процесса развинчивания соединения труб с полностью скрытым в них ниппелем, поскольку без устройства фиксации ниппель может произвольно вывинчиваться одновременно из обеих бурильных труб. Подобное решение реализовано посредством упругих пластин, расположенных на дорезьбовой части ниппеля, которые снабжены буртиками со скошенной передней гранью.

Кроме того, следует отметить, что благодаря нежесткой фиксации ниппеля и возможности смещения его относительно соединяемых бурильных труб во время прохождения через соединения силовых импульсов существенно большая часть деформации ниппеля, как показали эксперименты [24], заменяется его смещением относительно бурильных труб, что многократно увеличивает время безотказной работы ниппеля и в целом резьбового соединения труб.

При выборе указанного выше варианта соединений труб в бурильной колонне возникает задача обоснования и расчета рациональных геометрических параметров элементов устройства для нежесткой фиксации ниппеля в бурильной трубе, в частности длины упругих пластин - 8 с буртиком – 9 и их плоских поперечных сечений (рис. 3). С этой целью упругую пластину - 8 можно рассматривать как консольную балку, нагруженную на незакрепленном конце сосредоточенной силой, и по заданной величине перемещения буртика - 9 определить изгибающий момент и провести расчет на прочность пластины - 8, предварительно задавая геометрические параметры ее поперечного сечения и механические свойства материала пластины. Следует отметить, что при изгибе предельные упругие перемещения связаны не только со свойствами материала, но и в равной степени с отношением длины балки к размерам ее поперечного сечения в плоскости изгиба, последнее часто вызывает сложности в совместимости результатов предварительно принятых решений.

Для фиксирования одной половины ниппеля в бурильной трубе один конец его с упругими пластинами – 8 вворачивается в резьбовую часть труб с проточкой, в которой должен разместиться буртик – 9. При этом буртик будет изгибать пластину с максимальным прогибом, равным высоте резьбы. Для проведения расчетов по выбору рациональных геометрических параметров упругих пластин с буртиком можно принять высоту круглой резьбы равной 1,75 мм, которая использовалась в колонне бурильных труб с ниппельными соединениями [24]. Однако максимальный прогиб пластин - 8 желательно принять с небольшим запасом, т. е. равным 2 мм. Глубину проточки в бурильных трубах принимаем 2,5 мм для размещения в ней буртика с возможностью нежесткой фиксации ниппеля на резьбовом участке бурильной трубы.

Поставленную задачу решаем, составив уравнение упругой линии консольной балки, нагруженной на конце сосредоточенной силой P. Примем начало координат x, y в заделке балки. Изгибающий момент в сечении x равен M=P(l-x) (рис. 4). Подставив это выражение в приближенное диффе-

ренциальное уравнение упругой линии  $y'' = \frac{M}{EJ_x}$ ,

обеспечивающее определение прогиба (y) с точностью, вполне достаточной для практических расчетов, и, дважды проинтегрировав полученное уравнение, найдем

$$y = \frac{P}{EJ_{z}} \left( l \frac{x^{2}}{2} - \frac{x^{3}}{6} + Cx + D \right)$$

где C и D – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий. При x=0 в данном случае y=0 и y'=0, поэтому C=0 и D=0. Тогда

$$y = \frac{P}{EJ_z} \left( l \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right)$$

Максимальное значение прогиба будет в точке приложения силы P, т. е. при x=l

$$y_{\max} = \frac{Pl^3}{3EJ_z}.$$
 (1)



**Рис. 4** Прогиб консольной балки под действием сосредоточенной силы

Fig. 4. Hammer beam deflection under the action of concentrated force

Определим усилие *P*, действующее на буртик – 9 пластины (рис. 3), используя выражение (1) при заданных значениях:

- *y*<sub>max</sub>=2 мм;
- длина упругой пластины *l*=40 мм;
- нормальный модуль упругости для стали *E*=2·10<sup>5</sup> МПа;
- момент инерции поперечного прямоугольного сечения упругой пластины

$$J_z = \frac{h^3 b}{12},$$

где b=15 мм – ширина пластины; h=2 мм – толщина пластины.

Тогда из (1)

$$P = \frac{y_{\text{max}} \cdot 3EJ_z}{l^3} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2^3 \cdot 15}{40^3 \cdot 12} = 187,5 \text{ H.}$$

Используя полученное значение силы, действующей на буртик – 9 пластины – 8, по известной зависимости

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{\tiny HSF}}}{W_{z}} = \frac{6P \cdot l}{hb^{2}}$$
(2)

определяем максимальную величину напряжений в пластине – 8 по изгибающему моменту в заделке пластины и осевому моменту сопротивления поперечного сечения пластины

$$\sigma_{\max} = \frac{6P \cdot l}{hb^2} = \frac{6 \cdot 187, 5 \cdot 40}{15 \cdot 2^2} = 750 \text{ MIIa}$$

Таким образом, для изготовления ниппеля с устройством фиксации в одной из соединяемых бурильных труб можно использовать хромоникелевые стали, применяемые при изготовлении бурового оборудования, например 40XH, у которой предел текучести  $\sigma_{0,2}$ =785 МПа [25], что ниже полученного расчетного значения максимального напряжения в пластинах. При необходимости упругую зону напряжений можно увеличить за счет повторных нагружений пластин.

Предложенное соединение труб [24] характеризуется следующим:

- ниппель позволяет минимизировать потери энергии при распространении продольной волны деформации;
- волновой процесс приводит к сжатию участков труб и освобождению ниппеля от нормальных напряжений растяжения и деформации сжатия, создаваемых при затяжке соединения;
- фиксация ниппеля в одной из двух труб позволяет обеспечивать автоматизацию свинчивания-развинчивания бурильных труб;
- буртик и проточки повышают долговечность работы резьбового соединения на изгиб;
- расположение ниппеля внутри соединяемых труб сохраняет постоянство наружного диаметра бурильной колонны.

#### Выводы

- Одним из перспективных путей развития технологии и техники горизонтально- направленного бурения пилотных скважин для бестраншейной прокладки коммуникаций является оснащение буровых комплексов ударными узлами, что, в свою очередь, требует совершенствования конструкции бурильной колонны, прежде всего, соединений бурильных труб, позволяющих эффективно, с минимальными потерями энергии передавать силовые импульсы к породоразрушающему инструменту.
- 2. Выполненные авторами исследования выявили ряд преимуществ ниппельных соединений перед резьбовыми соединениями «труба в трубу» или муфтовыми. Одна из последних конструкций предложенного ниппельного соединения позволяет автоматизировать процесс «свинчивания-развинчивания» благодаря удерживанию ниппеля в одной конкретной трубе, дает возможность его ограниченного перемещения относительно резьбовых участков труб.
- 3. Основное преимущество соединений бурильных труб с полностью скрытым в них ниппелем связано с процессом радиального расширения и продольной деформации сжатия труб при прохождении силового импульса. Это освобождает ниппель от продольных деформаций растяже-

ния, снижает контактные напряжения в сопряженных витках резьбы бурильной трубы и ниппеля, в том числе от существенной доли касательных напряжений, поскольку крутящий момент во время прохождения силовых импульсов передается в основном через плотный контакт торцов соединяемых бурильных труб.

4. Предложенная гидравлическая система формирования силовых импульсов является по существу безбойковым ударным механизмом, обладающим высоким коэффициентом полезного действия по сравнению с обычными гидроударниками, в которых значительная часть энергии расходуется на возвратно-поступательные движения бойка в гидроцилиндре, а также на перемещение жидкости по рукавам высокого давления. Как показали экспериментальные исслетования силования сидрояния в сослетования сослетования сидериментальные исслетования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов Б.Б. Пути совершенствования технологий и технических средств для бестраншейной прокладки коммуникаций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 2. – С. 69–75.
- Cai L., Polak M.A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 83. – P. 313–323.
- Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads / M.A. Kamel, M. Eishafei, A.-W.A. Saif, A.A. Al-Majed // Proc. of 15<sup>th</sup> International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. – Tunisia-Hammamet, 2018. – P. 1172–1177.
- Rabiei M., Chang K.P., M. Gelinas, A. Neale Analysis and design of pipes installed via direct PIPE technology // Proc. of Conference: NASTT No-Dig Show. – Palm Springs, CA, March 25–29, 2018. – 11 p.
- Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. - 2017. - V. 25. - Iss. 4. - P. 3421-3434.
- Willoughby D. Horizontal Directional Drilling (HDD): Utility and Pipeline Applications (Civil Engineering). 1<sup>st</sup> ed. – New York: McGraw-Hill Professional, 2005. – 400 p.
- Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. - Michigan: McGraw-Hill, 2005. -489 p.
- Pipe Ramming Projects. Reston: ASCE Journal Publ., 2008. -82 p.
- Stangl G.A., Levings R.B. Horizontal Directional Drilling (HDD) systems for pilot bore drilling in mixed soil conditions and rock // Proc. of 30<sup>th</sup> International No-Dig Conference and Exhibition. – No-Dig Sao Paulo, 2012. – P. 345–366.
- Danilov B.B. Substation and Selection of Basic Technological Principles for the Evolvement of a New Procedure of the Controlled Horizontal Drilling // Archives of Mining Sciences. – Warsaw: Polish Academy of Sciences, 2008. – P. 205–212.
- Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). – М.: ПрессБюро № 1, 2005. – 304 с.
- Балаховский М.С. На Российском рынке американская фирма «Vermeer» // Механизация строительства. 2000. № 10. С. 2–7.
- Червов В.В. Энергия удара пневмомолота с упругим клапаном в камере обратного хода // ФТПРПИ. – 2004. – № 1. – С. 80–89.

дования данной системы, можно формировать силовые импульсы с плавно нарастающим передним фронтом и большей чем обычно длительностью, что позволит более рационально использовать их энергию на разрушение грунта. Причем такая система обладает свойством авторегулирования амплитуды формируемых силовых импульсов в зависимости от жесткости разрушаемой среды. С увеличением твердости горных пород амплитуда силовых импульсов будет автоматически резко возрастать.

Таким образом, реализация научно обоснованных технических решений, защищенных патентами РФ, позволяет существенно повысить производительность и надежность работы установок для горизонтально-направленного бурения пилотных скважин.

- 14. Пневмопробойники / К.С. Гурков, В.В. Климашко, А.Д. Костылев, В.Д. Плавских, Е.П. Русин, Б.Н. Смоляницкий, К.К. Тупицын, Н.П. Чепурной. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. 217 с.
- 15. Гилета В.П., Смоляницкий Б.Н. Проходка скважин с частичной экскавацией грунта // Строительные и дорожные машины. 2001. № 4. С. 7–9.
- Дерюшева В.Н. Модели пневмогидравлического ударного узла с учетом свойств формирователя импульса и нагрузки: автореф ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 19 с.
- Novoseltseva M.V., Masson I.A., Pashkov E.N. Investigation of input signal curve effect on formed pulse of hydraulic-powered pulse machine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - V. 127. - № 1. - P. 74-77.
- Shadrina A., Saruev L., Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. URL: https://doi.org/10.1088/ 1755-1315/43/1/012068 (дата обращения 12.10.2018).
- Шадрина А.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Разработка новых соединений труб для бурения опережающих скважин при проходке тоннелей и прокладке в них газонефтепроводов // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 35–36.
- Ударный узел установки ударно-вращательного бурения: пат. № 159850 Российская Федерация. МПК Е21В 6/00; заявл. 09.06.2015; опубл. 20.02.2016. – Бюл. № 5. – 3 с.
- Казанцев А.А., Саруев Л.А. Повышение эффективности вращательно-ударного бурения скважин малых диаметров: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 113 с.
- Ударный узел установки ударно-вращательного бурения: пат. № 79924 Российская Федерация. МПК Е21В 6/04 (2006.01); заявл. 21.07.2008; опубл. 20.01.2009. – Бюл. № 2. – 4 с.
- Ниппельное соединения буровых штанг: пат. № 157331 Российская Федерация. МПК Е21В 17/42. заявл. 09.06.2015; опубл. 27.11.2015. Бюл. № 33. 5 с.
- Шадрина А.В., Саруев Л.А., Саруев А.Л. Динамические процессы в колонне труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок: монография. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 175 с.
- Справочник металлиста. В 5-и т. Т. 2. / под ред. А.Г. Рахштадта, В.А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.

Поступила 11.02.2019 г.

## Информация об авторах

*Саруев Л.А.*, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томский политехнический университет.

Шадрина А.В., доктор технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томский политехнический университет.

*Capyes A.Л.*, кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томский политехнический университет.

Васенин С.С., машинист технологической установки АО «Газпромнефть – Московский НПЗ».

Пахарев А.В., директор ООО «Геотехновация».

#### UDC 621.644

## PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND FACILITIES OF PILOT BORES HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING FOR TRENCHLESS LAYING OF PIPELINES

Lev A. Saruev<sup>1</sup>,

saruevla@tpu.ru

Anastasiya V. Shadrina<sup>1</sup>,

avshadrina@rambler.ru

Alexey L. Saruev<sup>1</sup>, saruev@tpu.ru

Sergey S. Vasenin<sup>2</sup>,

vasenin8@gmail.com

## Aleksandr V. Pakharev<sup>3</sup>,

avpaharev@tpu.ru

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> «Gazpromneft Moskovskiy NPZ», bld. 3, 1, 2<sup>nd</sup> block, Kapotnya, Moscow, 109429, Russia.

<sup>3</sup> «Geotekhnovatsiya»,

4, bld. 5, 79 Gvardeyskaya diviziya street, Tomsk, 634057, Russia.

**The relevance.** In the process of horizontal directional drilling, it is often necessary to overcome solid inclusions or hard rocks, that requires the use of a rational way of their destruction by an impact. However, the existing percussion mechanisms of modern drill rigs form power impulses of irrational form, which do not take into account the properties of the rock to resist destruction. This form of power pulses and the short duration of their impact on the rock reduces the drilling deeper, forming a tensile deformation wave that destroys the drilling tool. Therefore, there was a need for scientific substantiation and development of a conceptually new technique to improve the technology of pilot bores horizontal directional drilling.

**The main aim** of the research is scientific substantiation and development of a fundamentally new former of power impulses in the drill string, taking into account the behavior penetration resistance into the rock, and new design of thread joints of drill pipes, taking into account the wave nature of the power impulses propagation through them for pilot bores horizontal directional drilling.

**Object:** facilities of horizontal directional drilling of pilot wells using the energy of power pulses propagating through the drill string.

**Methods:** review and analysis of scientific and technical information; methods of theoretical and applied mechanics; strain measurement of the drill string during elastic deformation waves propagation via a bench simulating artificial bores; mathematic simulation of the power pulses forming system and the process of their propagation through thread joints of the drill string.

**Results.** The paper introduces the overview of trenchles's technology. The authors have identified the prospects for improving the technology of horizontal directional drilling of pilot bores as the initial stage of trenchless pipe laying technology and proposed the techniques to improve the horizontal directional drilling of pilot wells, providing a significant increase in penetration drilling rate.

#### Key words:

Horizontal directional drilling, drilling rig, hydraulic system, drill string, drill pipe joint, power pulse.

#### REFERENCES

- Danilov B.B. Puti sovershenstvovaniya tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv dlya bestransheynoy prokladki kommunikatsiy [Ways to improve technologies and facilities for trenchless laying of communications]. *Journal of Mining Sciences*, 2007, no. 2, pp. 69–75.
- Cai L., Polak M.A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 83, pp. 313–323.
- Kamel M.A., Eishafei M., Saif A.-W.A., Al-Majed A.A. Automatic trenchless horizontal directional drilling using quad motors drilling heads. Proc. of 15<sup>th</sup> International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Tunisia-Hammamet, 2018. pp. 1172-1177.
- Rabiei M., Chang K.P., Gelinas M., Neale A. Analysis and design of pipes installed via direct pipe technology. *Proc. of Conference: NASTT No-Dig Show.* At Palm Springs, CA, March 25–29, 2018. 11 p.

- Tervydis P., Jankuniene R. Horizontal directional drilling pilot bore simulation. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2017, vol. 25, Iss. 4, pp. 3421–3434.
- Willoughby D. Horizontal Directional Drilling (HDD): Utility and Pipeline Applications (Civil Engineering). 1<sup>st</sup> ed. New York, McGraw-Hill Professional, 2005. 400 p.
- 7. Najafi M. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design. Construction and Renewal. Michigan, McGraw-Hill, 2005. 489 p.
- 8. Pipe Ramming Projects. Reston, ASCE Journal Publ., 2008. 82 p.
- Stangl G.A., Levings R.B. Horizontal Directional Drilling (HDD) systems for pilot bore drilling in mixed soil conditions and rock. *Proc. of 30<sup>th</sup> International No-Dig Conference and Exhibition.* – No-Dig Sao Paulo, 2012. pp. 345–366.
- Danilov B.B. Substation and Selection of Basic Technological Principles for the Evolvement of a New Procedure of the Controlled Horizontal Drilling. Archives of Mining Sciences. Warsaw, Polish Academy of Sciences, 2008. pp. 205-212.

- Rybakov A.P. Osnovy bestransheynykh tekhnologiy (teoriya i praktika) [Basics of trenchless technologies (theory and practice)]. Moscow, PressByuro № 1 Publ., 2005. 304 p.
- Balakhovskiy M.S. Na Rossiyskom rynke amerikanskaya firma «Vermeer» [On the Russian market – the American firm «Vermeer»]. Mekhanizatsiya stroitelstva, 2000, no. 10, pp. 2–7.
- Chervov V.V. Energiya udara pnevmomolota s uprugim klapanom v kamere obratnogo khoda [Pneumatic hammer impact energy with elastic valve in the recoil stroke chamber]. *Journal of Mining Sciences*, 2004, no. 1, pp. 80–89.
- Gurkov K.S., Klimashko V.V., Kostylev A.D., Plavskih V.D., Rusin E.P., Smolyanitsky B.N., Tupitsyn K.K., Chepurnoy N.P. *Pnevmoproboyniki* [Pneumodrifts]. Novosibirsk, IGD SO RAN Publ., 1990. 217 p.
- Gileta V.P., Smolyanitskiy B.N. Prokhodka skvazhin s chastichnoy ekskavatsiey grunta [Well drilling with partial soil excavation]. Stroitelnye i dorozhnye mashiny, 2001, no. 4, pp. 7–9.
- 16. Deryusheva V.N. Modeli pnevmogidravlicheskogo udarnogo uzla s uchetom svoystv formirovatelya impulsa i nagruzki. Avtoreferat Kand. nauk [Models of pneumohydraulic percussive mechanism, taking into account the properties of the pulse former and the load. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 19 p.
- Novoseltseva M.V., Masson I.A., Pashkov E.N. Investigation of input signal curve effect on formed pulse of hydraulic-powered pulse machine. *IOP Conference Series: Materials Science and En*gineering, 2016, vol. 127, no. 1, pp. 74–77.
- Shadrina A., Saruev L., Vasenin S. The technology improvement and development of the new design-engineering principles of pilot bore directional drilling. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014. Available at: https://doi.org/ 10.1088/1755-1315/43/1/012068 (accessed 12 October 2018).

- Shadrina, A.V., Saruev, L.A., Saruev, A.L. The new threaded pipe joint for pilot drilling at pipelining. *Oil Industry*, 2011, no. 2, pp. 36–37. In Rus.
- Vasenin S.S., Saruev L.A., Kuznetsov I.V. Udarny uzel ustanovki udarno-vrashchatelnogo bureniya [Percussive mechanism of percussion rotary drilling rig]. Patent RF no. 159850, 2016.
- Kazantsev A.A., Saruev L.A. Povyshenie ehffektivnosti vrashchatelno-udarnogo bureniya skvazhin malykh diametrov: monografiya [Intensification of rotary-percussive drilling of slim holes: monography]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2011. 113 p.
- Kazantsev A.A., Shadrina A.V., Saruev L.A., Saruev A.L. Udarny uzel ustanovki udarno-vrashchatelnogo bureniya [Percussive mechanism of percussion rotary drilling]. Patent RF no. 79924, 2009.
- Vasenin S.S., Saruev L.A. Nippelnoe soedinenie burovykh shtang [Nipple joint of drill rods]. Patent RF no. 157331, 2015.
- 24. Shadrina A.V., Saruev L.A., Saruev A.L. Dinamicheskie protsessy v kolonne trub pri vrashchatelno-udarnom burenii skvazhin malogo diametra iz podzemnykh gornykh vyrabotok: monografiya [Dynamic processes in a drill strings during rotary-percussive drilling of slim holes from underground mining workings: monography]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2009. 175 p.
- Spravochnik metallista [Reference book for metal scientists]. Eds. A.G. Rahshtadt, V.A. Brostrem. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. Vol. 2, 720 p.

Received: 11 February 2019.

#### Information about the authors

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasiya V. Shadrina, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey L. Saruev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey S. Vasenin, engineer, «Gazpromneft – Moskovskiy NPZ».

Aleksandr V. Pakharev, director, «Geotekhnovatsiya».

УДК 622.23.05; 67.05; 66.041

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ СУНГУЛИТ-ВЕРМИКУЛИТОВЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ

## Нижегородов Анатолий Иванович<sup>1</sup>,

nastromo irkutsk@mail.ru

#### Гаврилин Алексей Николаевич<sup>2</sup>,

tom-gawral@list.ru

#### \_\_\_\_

Мойзес Борис Борисович<sup>2</sup>,

mbb@tpu.ru

- <sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
- <sup>2</sup> Национальный исследовательски Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Усовершенствованная энерго- и ресурсосберегающая технология, реализуемая в новых технологических комплексах с предварительным «холодным» дообогащением, позволяет вернуть в промышленный оборот ценные сырьевые ресурсы и получить вермикулитовые и сунгулитовые концентраты из горнопромышленных отходов, накопленных на Ковдорском флогопит-вермикулитовом месторождении. В связи с этим данная работа посвящена вопросам совершенствования технологии переработки сунгулит-вермикулитовых конгломератов.

**Цель:** анализ возможности совершенствования технологии получения термоактивированного сунгулита и вспученного вермикулита из горно-промышленных отходов Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения и повышение ее энергоэффективности.

**Объект:** технологическое оборудование по переработке сунгулит-вермикулитовых конгломератов, реализующее энерго- и ресурсосберегающую технологию получения активированного сунгулита и вермикулитового концентрата.

**Методы** исследования базируются на экспериментальных данных и анализе процессов аэродинамического отделения вермикулита и сунгулита от оливин-пироксеновой породы и повышения доли сунгулита в сунгулит-вермикулитовом концентрате.

**Результаты** подтверждают достижение цели исследования. На их основе можно создать усовершенствованную технологию получения вермикулита, в том числе вспученного и магнезиально-силикатного реагента (термоактивированный сунгулит) из горно-промышленных отходов с экономией энергии до 182 кДж/кг, что уменьшает энергоемкость их переработки на 28 % по сравнению с предшествующей технологией. Кроме того, дополнительные технологические операции позволяют получить 350 кг вермикулита-сырца, 68 кг чистого магнезиально-силикатного реагента с размерами зерен 2,4...3,5 мм и 158 кг сунгулитового концентрата в термоактивированном виде с зернами 1,3...2,4 мм при почти 86 процентной концентрации. В целом можно сделать вывод о перспективности продолжения работ в области развития и совершенствования технологий переработки сунгулит-вермикулитовых конгломератов.

#### Ключевые слова:

Сунгулит-вермикулитовый конгломерат, сунгулит, вермикулит, пироксен-оливиновая порода, термоактивация, обжиг, разделение компонентов, скорость витания, технологический комплекс, «холодное» дообогащение, тепловая энергия.

#### Введение

Вермикулит и материалы на его основе, благодаря своим полезным свойствам, нашли широкое применение во многих сферах деятельности (охрана природы, металлургия, строительство и другие) [1–7], поэтому интерес к технологиям их получения высок.

За многие годы разработки Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения в заскладированных вскрышных породах и хвостохранилищах накопились сотни тысяч тонн высококачественного вермикулита и сопутствующего ему сунгулита, минерала из серпентиновой группы [8]. Технология обогащения этих горно-промышленных отходов, разработанная в горном институте Кольского научного центра, позволяет получить сунгулит-вермикулитовый конгломерат, в котором, кроме вермикулита и сунгулита, являющихся ценным сырьем для получения вспученного вермикулита и магнезиально-силикатного реагента [9, 10], содержится и оливин-пироксеновая фаза (рис. 1), подлежащая утилизации.

В работе [11] авторами настоящей статьи была представлена технология выделения этих целевых продуктов из сунгулит-вермикулитового конгломерата при обжиге в электрических модульно-спусковых печах. Специфика процесса термоактивации сунгулита состояла в том, что одновременно с ним подвергались обжигу оливин-пироксеновая фаза и вермикулит, входящие в состав конгломерата.

Поглощаемая вермикулитом теплота за 2,8...3,2 с приводит к дегидратации, выделению химически связанной воды и механической трансформации – вспучиванию его зерен. Остается отделить готовый вспученный продукт от остального материала – каменного гранулята (сунгулита, пи-



Рис. 1. Компоненты конгломерата: а, б) целевые продукты – вермикулит и сунгулит, в) оливин-пироксеновая порода

Fig. 1. Conglomerate components: a, b) target products - vermiculite and sungulite, c) olivine- pyroxene rock

роксена и оливина), например, методом отдува или высасывания из общего потока.

Термоактивация сунгулита – это его быстрое нагревание до температуры ~700...720 °С с последующей выдержкой в течение 20...25 минут в термоизолированном бункере при температуре не ниже 600 °С [8, 10]. Поскольку конгломерат содержит 34...36 % вермикулита, ~23...25 % сунгулита и более всего оливин-пироксеновой породы ~39...43 % [12], то нагревание в печи всего объема сыпучего материала нецелесообразно, так как более 40 % конгломерата, нагреваясь, рассеивает накопленное тепло в окружающую среду, а это прямые затраты энергии.

Насыпная плотность необожженного сунгулита составляет ~1026 кг/м<sup>3</sup>, и он на 21 % легче оливин-пироксеновая фазы (~1300 кг/м<sup>3</sup>), но после термоактивации сунгулит дополнительно теряет в массе 15...18 % из-за выхода гидратной воды, а оливин-пироксеновая порода легче не становится [8, 10, 11, 13]. Эти обстоятельства позволяют оптимизировать процессы получения активированного сунгулита и вспученного вермикулита из исходного сырья в едином технологическом комплексе.

Целью исследований стал анализ возможности совершенствования технологии получения термоактивированного сунгулита и вспученного вермикулита из горно-промышленных отходов Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения с последующим повышением ее энергоэффективности.

Объектом исследований в данной работе является технологическое оборудование по переработке сунгулит-вермикулитовых конгломератов, реализующее энерго- и ресурсосберегающую технологию получения активированного сунгулита и вермикулитового концентрата.

#### Экспериментальные исследования

Основная задача исследований состояла в разделении компонентов конгломерата до их термической обработки, чтобы вывести из дальнейшей переработки оливин-пироксеновую породу, не нагревая ее в печи. В связи с тем, что компоненты отличаются насыпной плотностью, рассматривались два варианта:

- разделение (сегрегация) частиц в слое сыпучего материала под действием вибрации;
- разделение частиц в потоке воздуха по скорости витания.

Известно, что под действием вибрации (псевдо ожижение) сыпучие материалы могут разделяться по [14–16]:

- плотности, если это смесь частиц различной плотности, более легкие «всплывают»;
- крупности, если частицы материала одной природы, более крупные постепенно заполняют верхние слои.

Для проведения экспериментов использовался конгломерат с размером частиц слюды 1,3...4 мм, частиц сунгулита и оливин-пироксеновой породы 1,3...3,5 мм (большее значение максимального размера слюды обусловлено прохождением плоских частиц слюды по диагонали ячеек проволочных сит).

Опыты по вибросегрегации частиц-компонентов исходного конгломерата проводились на вибростоле ВИМ-0,2-25М (ООО «Испытательные машины», г. Армавир, Россия) с диапазоном регулирования по частоте 5...25 Гц и амплитудой виброперемещения 0,8 мм.

В диапазоне частот 5...20 Гц вибрация не вызывала никаких изменений в массиве сыпучего материала, находившегося в стальном цилиндре, хотя при частоте 20 Гц (125,6 рад/с) пиковое значение виброускорения (12,6 м/с<sup>2</sup>) уже превышало ускорение свободного падения на 28 %. Частицы приходили в слабое хаотичное движение, но разделение не происходило.

При увеличении частоты возбуждения от 20 до 25 Гц наблюдалась незначительная тенденция к выходу частиц вермикулитовой слюды на поверхность, а при приближении к 25 Гц (пиковое виброускорение 19,7 м/с<sup>2</sup>) начиналось виброперемешивание.

Кроме того, во всем диапазоне частот не наблюдалось и разделения по крупности, хотя наиболее крупные частицы конгломерата превышали по размерам самые мелкие. Последующие опыты, проведенные с конгломератом сунгулит-оливин-пироксеновой породы, не дали новых результатов. Стало очевидно, что разность насыпных плотностей незначительна для проявления эффекта вибросегрегации.

Дальнейшие эксперименты по разделению частиц-компонентов проводились в потоке воздуха по скорости их витания.

При обзоре многочисленных источников информации, например [3, 4, 17, 18], данных по значениям скорости витания частиц интересующих авторов минералов найти не удалось, поэтому была сконструирована экспериментальная установка (рис. 2).

Экспериментальная установка содержит воздуховод – 1 внутренним диаметром d=0,04 м и высотой H=1,0 м, лоток – 2 для сбрасывания частицкомпонентов, установленный на высоте h=0,94 м, шиберную заслонку – 3, размещенную над лотком, прибор для измерения скорости воздушного потока – анемометр – 4, небольшой сосуд – 5 для сбора выпадающих частиц, рукав-воздухопровод – 6, фильтр – 7 и вытяжной осевой вентилятор – 8 с регулируемой угловой скоростью вращения рабочего колеса  $\omega$ .



Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – воздуховод; 2 – лоток; 3 – шиберная заслонка; 4 – анемометр; 5 – сосуд; 6 – рукав-воздухопровод; 7 – фильтр; 8 – вентилятор осевой

Fig. 2. Diagram of the experimental unit: 1 is the air duct; 2 is the tray; 3 is the gate valve; 4 is the anemometer; 5 is the container; 6 is the air hose; 7 is the filter; 8 is the axial fan

Опыты по определению скорости витания частиц вермикулита, сунгулита и частиц оливин-пироксеновой породы проводились при температуре ~20 °С. Сначала с помощью шибера – 3 и регулятора мощности осевого вентилятора – 8 устанавливалась скорость воздуха в воздуховоде – 1 и проводилось ее измерение с помощью анемометра Aero-Temp X-line X00123 с диаметром зонда измерительной крыльчатки 0,04 м. Начальная скорость составляла 3,4 м/с.

В каждом опыте через лоток – 2 в воздуховод – 1 сбрасывалось по шесть случайно выбранных частиц разных размеров: сначала вермикулита (из диапазона 1,3...4 мм), затем сунгулита и оливинпироксена (1,3...3,5 мм). В некоторых опытах при одной и той же скорости воздуха для большей достоверности шесть частиц-компонентов сбрасывались по два-три раза.

В табл. 1 приведены значения числа выпавших и унесенных потоком частиц вермикулита при различных значениях скорости воздуха *v*.

Таблица 1. Результаты экспериментов с частицами вермикулита

Скорость потока	Число выпавших	Число унесенных воздухом			
воздуха <i>v</i> , м/с	частиц	частиц (среднее значение)			
Air flow rate v,	Number of fallen	Number of air entrained			
m/s	particles	particles (average value)			
3,8	4	2			
4,4	4/3	2/3 (2,5)			
6,3	3	3			
7,6	2	4			
9,6	1/2/0	5/4/6 (5,0)			
10,6	0/0/0	6/6/6 (6,0)			

 Table 1.
 Experimental results with vermiculite particles

В табл. 2 приведены значения числа выпавших и унесенных потоком частиц сунгулита и оливинпироксеновой породы при различных значениях скорости воздуха v (в скобках даны средние по двум-трем сбрасываниям значения унесенных частиц).

Таблица 2. Результаты экспериментов с частицами сунгулита и оливин-пироксеновой породы

 
 Table 2.
 Experimental results with sungulite particles and olivine-pyroxene rock

s/s	Оливин-п	ироксеновая порода	Сунгулит				
oK8 ∩c	Olivin	e- pyroxene rock	Sungulite				
U, M te v	Выпало	Унесено частиц	Выпало	Унесено частиц			
ть ха rai	частиц	(среднее значение)	частиц	(среднее значение)			
poc ow	Number	Number of air en-	Number	Number of air en-			
r fl	of fallen	trained particles	of fallen	trained particles			
Ai O	particles	(average value)	particles	(average value)			
3,7	6	0	6	0			
6,5	6	0	6	0			
7,5	6	0	6	0			
9,6	6	0	6	0			
12,3	6	0	3/3	3/3 (3)			
15,4	4/5	2/1 (1,5)	4/1	2/5 (3,5)			
17,5	3/4/2	3/2/4 (3,5)	2/1/1	4/5/5 (4,67)			
18,6	2/3/2	4/3/4 (3,67)	1/0/1	5/6/5 (5,33)			
20,1	1/2/2	5/4/4 (4,33)	0/0/0	6/6/6 (6,0)			
22,9	0/0/1	6/6/5 (5,67)	-	_			
23,7	0/0/0	6/6/6 (6,0)	-	-			

Из-за потерь на трение в начале и в конце воздуховода возникает разность давлений  $\Delta p$ . Это вызывает возрастание скорости потока на выходе, но при h=0,94 м падение давления и изменение скорости пренебрежимо малы, поэтому погрешностью измерения скорости витания частиц можно пренебречь.

На рис. 3 показаны зависимости, отражающие количество унесенных потоком воздуха частицкомпонентов конгломерата (по средним значениям табл. 1, 2) от скорости v на входе в воздуховод (место установки анемометра).

Для частиц-компонентов вермикулитовой слюды все шесть ее частиц были унесены потоком воздуха при скорости ~11,0 м/с (рис. 3), поэтому ориентировочно скорость витания вермикулита можно принять как среднюю из диапазона 9,2...11,0 м/с:

## $v_{\rm \tiny BB}{=}10,1$ м/с.

В пневмотранспортных установках расчетную скорость воздуха, обеспечивающую гарантированное перемещение сыпучего материала, принимают на 15...30 % больше, чем скорость витания, но это обусловлено высокой концентрацией частиц, необходимостью достижения наибольшей производительности и наличием горизонтальных участков [19].

В представленной работе речь идет о процессе аэродинамического разделения частиц, поэтому верхний предел скорости (рис. 3) интервала определим как скорость гарантированного отделения (уноса) вермикулита от остальных частиц-компонентов конгломерата  $v_{\rm s,v}=11,0$  м/с.



Рис. 3. Зависимости для определения скорости витания компонентов сунгулит-вермикулитовых конгломератов: слюда ~(1,3...,0 мм), сунгулит и оливин-пироксеновая порода ~(1,3...3,5 мм)

Fig. 3. Dependencies for determining soaring speed of sungulite-vermiculite conglomerates components: mica ~(1,3...4,0 mm), sungulite and olivine-pyroxene rock ~(1,3...3,5 mm)

Очевидно, что отделение вермикулита в аэродинамическом устройстве будет максимально эффективным, так как скорость витания сунгулита на 87 % больше, а оливин-пироксеновой фазы – больше в два раза. При этом уносимый воздухом вермикулит практически не будет содержать никаких других частиц-компонентов.

Для сунгулита скорость витания составила *v*<sub>в</sub>=18,9 м/с, а частиц оливин-пироксеновой породы – 22,2 м/с (рис. 3), что на 17,5 % больше, чем для сунгулита.

Эти данные получены для самых крупных по размеру частиц – 3,5 мм. Чтобы обобщить результаты, необходимо получить аналитическую зависимость скоростей витания сунгулита и оливинпироксеновой фазы от условных диаметров частиц из диапазона 1,3...3,5 мм.

Теоретически скорость витания определяется из условия равновесия частицы в потоке воздуха в вертикальном воздухопроводе [19]:

$$v_{\rm\scriptscriptstyle B} = 5,31 \sqrt{D_{\rm\scriptscriptstyle y} \frac{\rho_{\rm\scriptscriptstyle M}}{\rho_{\rm\scriptscriptstyle B}}},\tag{1}$$

где 5,31 – эмпирический коэффициент с размерностью (м)<sup>1/2</sup>/с;  $\rho_{\rm m}$  – истинная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\rm B}$  – плотность воздуха, для всасывающих воздуховодов  $\rho_{\rm B} \approx 0.95$  кг/м<sup>3</sup>[19];  $D_{\rm y}$  – условный диаметр частицы, м.

Условный диаметр частицы определяется по формуле:

$$D_{y} = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  – три произвольно измеренных размера частицы, м.

Истинные средние плотности сунгулита и оливин-пироксеновой породы составляют соответственно: ~2550, ~3500 кг/м<sup>3</sup> [20].

Задавая значения условного диаметра в диапазоне 1,0...4,0 мм, построим расчетные зависимости 1 и 2 (рис. 4).



Рис. 4. Зависимости скорости витания частиц сунгулита и оливин-пироксеновой породы от их условных диаметров: 1, 2 – расчетные; 3, 4 – экспериментально откорректированные

Fig. 4. Dependences of soaring speed of sungulite and olivine-pyroxene rock particles on their nominal diameters: 1, 2 - calculated; 3, 4 - experimentally corrected

Для частиц условным диаметром 3,5 мм нанесем точки, определяющие соответствующие экспериментальные значения: скорость витания сунгулита  $v_{\rm B}$ =18,9 м/с, оливин-пироксеновой породы – 22,2 м/с. Отношения этих значений к своим теоретическим значениям, полученным расчетом по формуле (1), и для сунгулита, и для оливин-пироксена составляет  $k_3$ =1,16. Введем этот эмпирический коэффициент в формулу (1) как корректировочный:

$$v_{\rm B} = 5,31 \cdot k_{\rm P} \sqrt{D_{\rm y} \frac{\rho_{\rm M}}{\rho_{\rm B}}}.$$
 (2)

Формулу (2) можно использовать для расчетов скорости витания частиц-компонентов как откорректированную и более точную для данных материалов.

#### Технология «холодного» дообогащения сунгулита

Расчетная скорость потока в воздуховоде, обеспечивающая гарантированный унос частиц сунгулита, – это верхний предел из интервала:

## *v*<sub>с.у</sub>=19,6 м/с.

Из рис. З видно, что это значение приближается к нижней границе диапазона скоростей для оливин-пироксеновой породы (21,7 м/с). Это значит, что чистого «холодного» (до термообработки в печи) разделения сунгулита и оливин-пироксеновой фазы достигнуть не удастся. В частности, при скорости  $v_{c,y}=19,6$  м/с (рис. З) из шести частиц оливин-пироксена вместе с сунгулитом будет уноситься четыре частицы (т. *a*), а это примерно 66...67 % от его общего количества. По соотношению числа частиц расчет слишком приблизительный.

Для дальнейшего анализа воспользуемся гистограммой распределения весовых остатков на проволочных ситах навеска оливин-пироксеновой породы в 0,232 кг. На рис. 5 показано процентное распределение остатков на лабораторных ситах С 12/38 с размерами ячеек в свету: 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2 и 4,0 мм. Анализ гистограммы показал, что в общем массиве в небольшом количестве содержатся частицы менее 1,3 мм и более 3,5.



Рис. 5. Гистограммы весовых остатков оливин-пироксена на ситах с ячейками: 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,3; 4,0 мм

Fig. 5. Histograms of weight residues of olivine-pyroxene on screens with cells: 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,3; 4,0 mm

Расчет суммарной массы мелких частиц (относительно 2,4 мм) дает значение 0,1503 кг, что составляет 64,8 %, остальные 0,0817 кг – это масса крупных частиц (35,2 %). Распределение весовых остатков расфракционированной навески сунгулита показало похожее соотношение мелких (66,1 %) и крупных (33,9 %).

Таким образом, вместе с сунгулитом будет уноситься примерно 65 % по массе относительно частиц оливин-пироксеновой фазы от его общего количества.

Как отмечалось выше, в исходном конгломерате в среднем содержится:

- 35 % вермикулита;
- 24 % сунгулита;
- 41 % оливин-пироксена.

Например, при общей массе исходного конгломерата 1000 кг масса оливин-пироксеновой фазы составит 410 кг, следовательно:

 вместе с сунгулитом будет унесено оливин-пироксеновой фазы:

• после «холодного» обогащения будет выведено и утилизировано остальное:

В итоге в разделенном виде будет получено концентрата:

- вермикулитового 350 кг;
- сунгулитового 506,5 кг (240+266,5).
   При этом полученный концентрат будет содер-

жать по массе 47,4 % сунгулита. Для увеличения концентрации целевого продукта проводится вторая технологическая операция – выделение крупных частиц сунгулита (2,4 мм и более) из общей массы в 506,5 кг на барабанном сите. Таким образом, из 47,4-процентного концентрата будет выделено 81,4 кг сунгулита (33,9 % от 240 кг). Оставшаяся смесь частиц будет иметь общую массу 425,1 кг с содержанием:

- сунгулита 158,6 кг (240–81,4);
- оливин-пироксеновой породы 266,5 кг.

Концентрация сунгулита уменьшится и составит всего 35,1 % .

В результате второго технологического передела (фракционирования) из исходной массы в 1000 кг будет выделено целевых продуктов:

- 350 кг вермикулитового концентрата, который после обжига в печи (при коэффициенте вспучивания примерно 8,1 м<sup>3</sup>/тн) даст 2,84 м<sup>3</sup> вспученного вермикулита;
- 81,4 кг сунгулита, который из-за потери примерно 17 % химически связанной воды, как отмечалось выше, после термоактивации в печи даст 67,6 кг чистого магнезиально-силикатного реагента.

Третий этап технологии «холодного» дообогащения — повторное аэродинамическое разделение частиц-компонентов, но уже при других скоростях витания и уноса. В соответствии с зависимостями 3 и 4 (рис. 4) эти скорости будут определяться уже по условному диаметру частиц  $D_y=2,4$  мм и составят:

• для сунгулита –  $v_{\text{с.в}}$ =16,2 м/с;

 для оливин-пироксеновой породы – v<sub>о.п.в</sub>=18,1 м/с. Исходя из значений соотношений скорости витания и скорости отделения для частиц с условными диаметрами 3,5 мм:

- для сунгулита 1,037;
- для оливин-пироксеновых частиц 1,018;

рассчитаем скорости уноса частиц с  $D_y=2,4$  мм:

- для сунгулита v<sub>с.у</sub>=16,8 м/с
- для оливин-пироксеновых и  $v_{0...,y}$ =18,4 м/с.

Проанализируем зависимости (рис. 3) при значении скорости уноса частиц сунгулита 16,8 м/с. Построенная вертикальная линия определит точки пересечения b и c на зависимостях для сунгулита и оливин-пироксена. На правой оси ординат точке b будет соответствовать значение количества отделенных и уносимых потоком воздуха частиц сунгулита, равное шести. На основании этого произведем разметку от нуля до шести. Точка c определит значение числа частиц оливин-пироксеновой породы, которые будут унесены вместе с сунгулитовыми частицами – 3,45, а это примерно 57 % от шести, что соответствует уносу 152 кг оливин пироксеновых частиц (266,5 0,57=152).

В результате третьей технологической операции будет отделено и утилизировано:

266,5-152=114,5 кг.

Полученная смесь частиц будет содержать:

мелкой оливин-пироксеновой породы – 152 кг;
мелкого сунгулита – 158,6 кг.

При условном возвращении в эту смесь ранее отделенной фракционированием части сунгулита в 81,4 кг (всего сунгулита 158,6+81,4=240 кг) получим окончательно после всех операций «холодного» дообогащения сунгулитовый концентрат с содержанием:

- оливин-пироксеновой породы 152 кг;
- сунгулита 240 кг (при его массовой концентрации 61,2 %.)

#### Энергетические аспекты

Выполненные расчеты показывают, что качество получаемого сунгулитового концентрата можно признать хорошим по трем соображениям.

Во-первых, при сравнении содержания сунгулита по массе с его содержанием при отделении только вермикулита наблюдается хороший результат: 61,2 % против 37 % (240/650).

Во-вторых, при первой и третьей технологических операциях из исходного конгломерата будет выведено и утилизировано 143,5+114,5=258 кг (63 % от 410 кг) оливин-пироксеновой породы без затрат тепловой энергии на ее обжиг в печи.

В-третьих, остается возможность дообогащения сунгулита после термической обработки в печи.

Оценим экономию тепловой энергии за счет выведения и утилизации оливин-пироксеновой породы.

В работе авторов [11] определены ориентировочные значения усвоенных тепловых энергий минералами, входящими в состав одного килограмма сунгулит-вермикулитового конгломерата с учетом температур их нагрева:

- вермикулита  $\theta_{\scriptscriptstyle B}$ =211,6 кДж;
- сунгулита θ<sub>c</sub>=160,5 кДж;
- оливин-пироксена  $\theta_{on}$ =282,6 кДж.

Суммарное поглощение теплоты составило 654,7 кДж.

С учетом выделения и утилизации 61,2 % оливин-пироксеновой породы, определим экономию тепловой энергии при дальнейшей термообработке минералов-компонентов конгломерата:

$$\theta_{\theta} = 0,41 \cdot 0,612c_{\text{on}} \cdot 0,95mT_{\text{on}}, \qquad (3)$$

где 0,41 — массовая доля оливин-пироксеновой породы в конгломерате;  $c_{on}$  — средняя удельная теплоемкость оливин-пироксена (772 Дж/кг.°К [21]); 0,95 — коэффициент, учитывающий потерю массы минерала за счет выхода физической воды (при 5 % влажности); m — масса исходного конгломерата (1 кг);  $T_{on}$  — примерная средняя температура перегрева оливин-пироксена (715 °C=988 °K [11]).

Расчет по формуле (3) дает значение экономии тепловой энергии  $\theta_3$ =181,8 кДж, что составляет 28 % от суммарного поглощения теплоты 654,7 кДж.

Снижение удельной энергоемкости обжига вермикулитового и термоактивации сунгулитового концентратов после их «холодного» дообогащения также составляет 28 %. В абсолютных значениях это – 472,9 кДж/кг против 654,7 кДж/кг, что является хорошим результатом.

#### Технологическое оборудование

Опыт работы с вермикулитом показал, что даже качественные концентраты Ковдорского горнообогатительного комбината с регламентированным содержанием вермикулита 97...98 % от партии к партии значительно отличаются. Иногда в некоторых партиях весом 56000...60000 кг вместе с вермикулитом идет существенное количество песка – до 7...9 % по массе. Для переработки таких концентратов было опробовано аэродинамическое разделительное устройство, выполненное как насадок, установленный вместо затвора накопительного бункера (рис. 6).



**Рис. 6.** Экспериментальное аэродинамическое разделительное устройство

Fig. 6. Experimental aerodynamic separation device

Испытания устройства на таких «запесоченных» концентратах показали положительный результат: при производительности электрической модульно-спусковой печи [11] по вспученному материалу 1,25...1,5 м<sup>3</sup>/ч вермикулит полностью выводился из общего массива.

В нашем случае разделению подлежали не вспученные компоненты, поэтому усовершенствованное устройство представляло собой более сложную конструкцию (рис. 7).

Аэродинамическое разделительное устройство содержит вертикальный канал – 1 коробчатого сечения, в который из дозатора поступает просушенный сунгулит-вермикулитовый конгломерат. Лопасти – 2 служат для направления потока сыпучего материала по нижней поверхности, в которой выполнены поперечные прорези – 3, пропускающие воздух в процессе работы устройства.

На верхней поверхности закреплены патрубки, имеющие фасонную форму. В нижней части (разрез A-A) сечение патрубка – 4 имеет плоскую скругленную форму, плавно переходящую в окружность, – патрубок – 5. При этом площади сечений патрубков – 4, 5 для отвода вермикулита  $s_1$  и  $s_2$ равны. Также равны между собой и площади сечений патрубков – 4, 5 для отвода сунгулита (но не равны между собой). Далее патрубки – 5 через отводы – 6 соединяются с вертикальными патрубками – 7. В нижней части устройства имеется выходной щелевидный канал – 8 для выхода оливин-пироксеновой породы.

Патрубки – 4, отводящие сунгулит, несколько наклонены навстречу движущимся частицам, уже набравшим скорость вдоль нижней поверхности. При этом на входе в плоские патрубки – 4 скорость воздуха равна скорости уноса сунгулита  $v_{c,y}=19,6$  м/с, а в патрубках для отвода вермикулита скорость соответственно равна  $v_{s,y}=11,0$  м/с.

Настройка скоростей всасывания обеспечивается регуляторами мощности и шиберами вытяжных вентиляторов, входящих в состав установки (рис. 8).

Установка содержит аэродинамическое разделительное устройство -1, соединенное вертикальным каналом с дозатором сунгулит-вермикулитового конгломерата – 2. За счет вытяжных вентиляторов – 3, 4 в бункерах-осадителях – 5, 6 создается разряжение, степень которого регулируется шиберами в их всасывающих отверстиях (на рисунке не показаны) и дополнительно, для точной настройки скоростей  $v_{\text{с.v}}$  и  $v_{\text{в.v}}$  – регуляторами мощности самих вентиляторов. Благодаря разряжению в плоских патрубках – 4 (рис. 7) вермикулит, а затем и сунгулит с мелкими частицами оливин-пироксена высасываются из общего потока исходного конгломерата и, за счет резкого расширения пространства бункеров-осадителей при выходе из трубопроводов – 7 и 8, выпадают внутрь. Бункер – 5 накапливает вермикулит, бункер – 6 – смесь сунгулита и оливин-пироксеновой породы, но большая часть последней выходит через щелевидный канал - 7 (рис. 7) аэродинамического устройства.



Рис. 7. Схема аэродинамического разделительного устройства: 1 – вертикальный канал; 2 – лопасти; 3 – прорези; 4, 5 – патрубки; 6 – отводы; 7 – продуктопроводы; 8 – выходной щелевидный канал

Fig. 7. Diagram of aerodynamic separation device: 1 is the vertical channel; 2 are the blades; 3 are the mortises; 4, 5 are the branch pipes; 6 are the bends; 7 is the supply pipeline; 8 is the output slotted channel

По мере наполнения бункеров-осадителей – 5, 6 их опорожняют, но лишь частично, чтобы не возникало просасывания воздуха через затворы, соединяющие их с приемными бункерами – 9, 10 (рис. 8). Далее материалы, накопленные в них, отправляют на термообработку в электрическую модульно-спусковую печь, функционирование которой в составе технологического комплекса рассмотрено в работе [22].

#### Технология «горячего» дообогащения сунгулита

Вернемся к сунгулитовому концентрату с отделенными фракционированием крупными частицами сунгулита при его содержании 35,1 %, в котором целевого продукта содержится 158,6 кг при общей массе материала 425,1 кг.

При термоактивации сунгулит теряет в массе в среднем 17 %, а это снижает его насыпную плотность до 852 кг/м. Так как насыпные плотности оливин-пироксеновой фазы и активированного сунгулита соответственно равны 1300 и 852 кг/м<sup>3</sup>, то уменьшение исходной плотности целевого продукта – магнезиального реагента, будет составлять уже только 34,5 %.

Согласно графикам (рис. 3), можно выделить три критические точки, соответствующие скоростям уноса:

- вермикулита  $v_{\rm B,v}$ =11,0 м/с;
- сунгулита v<sub>с.v</sub>=19,6 м/с;
- оливин-пироксена  $v_{\text{о.п.у}}$ =22,6 м/с.



Puc. 8. Установка для «холодного» дообогащения сунгулита Fig. 8. Unit for «cold» re-preparation of sungulite

Для построения графиков зависимости скорости уноса частиц компонентов сунгулит-вермикулитового конгломерата от их насыпной плотности требуется значение плотности вермикулита-сырца. Данное значение было определено взвешиванием проб выделенных из исходного концентрата вермикулитовых частиц (рис. 1, *a*) и составило 720 кг/м<sup>3</sup>.

По трем точкам построен (интерполирован) график зависимости скорости уноса частиц-компонентов от их насыпной плотности (рис. 9).

- **Рис. 9.** Зависимость скорости уноса частиц от насыпной плотности компонентов сунгулит-вермикулитового конгломерата
- Fig. 9. Dependence of the rate of entrained particles on bulk density of sungolite-vermiculite conglomerate components



Для требуемого значения насыпной плотности термоактивированного сунгулита ( $\rho$ =852 кг/м<sup>3</sup>) определим ориентировочное значение скорости уноса его наиболее крупных частиц  $\geq$ 3,5 мм –  $v_{\rm r.c.y}$ =16,2 м/с.

На рис. 10 показаны экспериментальные зависимости (рис. 3), адаптированные для определения скоростей уноса после термоактивации сунгулита и обжига оливин-пироксена (точки экспериментальных значений удалены).

График 2, соответствующий активированному сунгулиту, получен параллельным переносом графика 1 до критической точки с координатой  $v_{\rm r.c.y}=16,2$  м/с.

На оси ординат (рис. 10) расположена правая по рис. 3 шкала «n, шт», хотя сами графики для сунгулита и оливин-пироксеновой породы не изменены. Теперь для частиц-компонентов с размерами меньше 2,4 мм скорость уноса термоактивированного сунгулита, определяемая, как и раньше, по шести частицам, может быть установлена положением точки a на графике 2:

#### *v*<sub>т.с.у</sub>=13,0 м/с.

Данному значению скорости соответствует число частиц оливин-пироксена, унесенных вместе с частицами легкого сунгулита, – 0,5 (определяется положением точки  $\delta$ ). Это значит, что после термической обработки и аэродинамического разделения всего 8,3 % (100 %·0,5/6) от общего количества сунгулитового концентрата будет составлять оливин-пироксеновая фаза.



Рис. 10. Графики к определению скоростей уноса после термоактивации сунгулита и обжига оливин-пироксеновой фазы

Fig. 10. Graphs to determine the entrained rate after sungulite thermal activation and heat-treatment burning olivine-pyroxene phase

В процессе «холодного» дообогащения и фракционирования была получена смесь частиц общей массой 425,1 кг с содержанием оливин-пироксеновой породы – 266,5 кг и сунгулита 158,6 кг при концентрации последнего всего 35,1 %. Этот материал будет подвергнут термообработке. Масса активированного сунгулита из-за выхода химически связанной воды уменьшится на 17 % и составит 131,6 кг (158,6·0,83). Вместе с тем оставшиеся в полученном концентрате 8,3 % оливин-пироксена – это 22,1 кг (0,083·266,5), а общая масса концентрата составит 153,7 (22,1+131,6).

В результате «горячей» технологической операции при последующем аэродинамическом разделении будет получен мелкий (1,3...2,4 мм) сунгулитовый концентрат с содержанием сунгулита 85,6 % (100 %·131,6/153,7).

Несмотря на то, что данные и ранее полученные значения являются прогнозными, так как точность расчетов не высока, в целом получены хорошие результаты.

#### Заключение

Результаты работы демонстрируют достижение цели исследования.

Усовершенствованная технология получения вермикулита и активированного сунгулита из горно-промышленных отходов Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения станет менее энергоемкой. На переработку одной тонны сунгулит-вермикулитового конгломерата потребуется 472,9 мДж вместо прежних 654,7 мДж [11], т. е. на 28 % меньше.

В результате применения дополнительных технологических операций: первичного аэродинамического разделения компонентов, фракционирования, повторного аэродинамического разделения, но уже при других скоростях витания и окончательного разделения после термической обработки, из одной тонны конгломерата может быть получено:

- 350 кг вермикулита-сырца или 2,84 м<sup>3</sup> вспученного продукта;
- 67,6 кг чистого магнезиально-силикатного реагента с размерами зерен 2,4...3,5 мм;
- 157,7 кг сунгулитового концентрата в термоактивированном виде с зернами 1,3...2,4 мм при концентрации 85,6 %.

Новый энергосберегающий технологический комплекс по переработке сунгулит-вермикулитовых конгломератов, рассмотренный в работе авторов [11], реализующий эту усовершенствованную технологию выделения целевых продуктов, дополнится лишь установками аэродинамического дообогащения и фракционирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Fan Ding et al. Tuning wettability by controlling the layer charge and structure of organo-vermiculites // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. - 2018. - V. 57. - P. 304-312.
- Figueiredo S. The influence of acid treatments over vermiculite based material as adsorbent for cationic textile dyestuffs // Chemosphere. - 2016. - V. 153. - P. 115-129.
- Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories // Applied Clay Science. - V. 161. -2018. - P. 139-150.
- Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 94. – P. 186–192.
- Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar / Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling // Construction and Building Materials. – 2018. – V. 179. – P. 302–306.
- Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // Applied Clay Science. - 2017. - V. 146. - P. 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. - V. 151. - P. 189-193.
- Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 4. – С. 33–40.
- Выделение вермикулитового концентрата из хвостов обогащения вермикулитовых руд и его использование в жаростойком бетоне / А.Ш. Гершенкоп, М.С. Хохуля, О.Н. Крашенинников и др. // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 57–59.
- Аморфизация 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.
- Нижегородов А.И., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Применение и технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов // Известия Том-

ского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 67–73.

- 12. Направления комплексного использования отходов добычи флогопита / С.В. Терещенко, И.П. Кременецкая и др. // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли: сборник докладов Всеросс. науч. техн. конф. В 2 т. – Апатиты; СПб.: Реноме, 2014. – Т. 1. – С. 272–279.
- Звездин А.В. К технологии получения сунгулитовых и вермикулитовых концентратов из вскрышных пород Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 8. – С. 93–99.
- 14. Вибрации в технике: справочник в 6-ти т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
- Harris C.M., Piersol A.G. Harris' shock and vibration handbook. - New York: McGraw-Hill Professional, 2002. - 1460 p.
- Ahirrao N.S., Bhosle S.P., Nehete D.V. Dynamics and Vibration Measurements in Engines // Procedia Manufacturing. – 2018. – V. 20. – P. 434–439.
- Rashad A.M. Vermiculite as a construction material A short guide for Civil Engineer // Construction and Building Materials. – V. 125. – 2016. – P. 53–62.
- Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used / ed. by J.E. Kogal. - Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. - 1529 p.
- Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1974. 431
- 20. Горная энциклопедия. URL: http://www.mining-enc.ru (дата обращения 25.06.2018).
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / под ред. Н.Б. Дортмана. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
- Нижегородов А.И., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б. Технологический комплекс для переработки вермикулитовых концентратов и конгломератов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 11. С. 74–86.

Поступила 12.11.2018 г.

## Информация об авторах

*Нижегородов А.И.*, доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

*Гаврилин А.Н.*, кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Мойзес Б.Б.*, кандидат технических наук, доцент отделения контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета.

#### UDC 622.23.05; 67.05; 66.041

## IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR PROCESSING SUNGULITE-VERMICULITE CONGLOMERATES

Anatoly I. Nizhegorodov<sup>1</sup>,

nastromo irkutsk@mail.ru

## Alexey N. Gavrilin<sup>2</sup>,

tom-gawral@list.ru

## Boris B. Moyzes<sup>2</sup>,

mbb@tpu.ru

- Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Avenue, Irkutsk, 664074, Russia.
- <sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** The improved energy and resource-saving technology, implemented in new technological complexes with preliminary «cold» re-preparation, allows returning valuable raw material resources to industrial circulation and obtaining vermiculite and sugulite concentrates from mining waste accumulated in the Kovdor flogopit-vermiculite deposit. Therefore, this work is devoted to the issues of improving the processing of sungulite-vermiculite conglomerates.

**The aim** of the research is to analyze the possibility of improving the technology for producing thermally activated sungulite and expanded vermiculite from mining wastes of the Kovdor phlogopite-vermiculite deposit and increasing its energy efficiency.

**The object** of the research is the technological equipment for processing sungulite-vermiculite conglomerates, which implements energy- and resource-saving technology for producing activated sungulite and vermiculite concentrate.

The methods are based on the experimental data and analysis of aerodynamic separation of vermiculite and sungulite from olivine-pyroxene rock and increase of allotment of sungulite in sungulite concentrate.

**The results** prove the aim of the research is achieved. On their basis, it is possible to develop the improved technology for vermiculite producing, including expanded and magnesia-silicate reagent (thermoactivated sungulite) from mining industrial wastes with energy savings of up to 182 kJ/kg, which reduces energy consumption of their processing by 28 % compared to the previous technology. Besides, additional technological operations make it possible to obtain 350 kg of raw vermiculite, 68 kg of pure magnesia-silicate reagent with grain sizes of 2,4...3.5 mm and 158 kg of sungulite concentrate in a thermo-activated form with grains of 1,3...2,4 mm at almost 86 percent concentration. In general, we can conclude that the continuation of work in the field of development and improvement of technologies for processing sungulite-vermiculite conglomerates is promising.

#### Key words:

Sungulite-vermiculite conglomerates, sungulite, vermiculite, pyroxene-olivine rock, thermo-activation, burning process, components separation, soaring speed, technological complex, «cold» re-preparation, heat energy.

#### REFERENCES

- 1. Fan Ding. Tuning wettability by controlling the layer charge and structure of organo-vermiculites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, vol. 60, pp. 304–312.
- Figueiredo S. The influence of acid treatments over vermiculite based material as adsorbent for cationic textile dyestuffs. *Chemosphere*, 2016, vol. 153, pp. 115–129.
- Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 161, pp. 139–150.
- Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp 186–192.
- Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 179, pp 302-306.
- 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.

- 8. Gershenkop A.Sh., Khokhulya M.S., Krasheninnikov O.N., Bastrygina S.V. Allocation of vermiculite concentrate from tailings of vermiculite ores and its use in heat-resistant concrete. *Gorny zhurnal*, 2011, vol. 11, pp. 57–59. In Rus.
- Kremenetskaya I.P., Korytnaya O.P., Vasileva T.N. Reagent dlya immobilizatsii tyazhelykh metallov iz serpentinsoderzhashchikh vskryshnykh porod [Reagent for immobilization of heavy metals from serpentineros overburden]. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie, 2008, vol. 4, pp. 33–40.
- Kremenetskaya I.P., Belyaevskiy A.T., Vasileva T.N., Korytnaya O.P., Makarova T.I. 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. In Rus.
- Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B. Application and production technology of thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 67–75. In Rus.
- 12. Tereshchenko S.V., Alekseeva S.A., Rukhlenko E.D., Kremenetskaya I.P., Bastrygina S.V., Ivanova L.A. Napravleniya kompleksnogo ispolzovaniya otkhodov dobychi flogopita [Directions of comprehensive utilization of phlogopite waste]. *Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli. Sbornik do*
kladov Vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii [Proc. of All Russian scientific conference. Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli]. Apatity; Saint-Petersburg, Renome Publ., 2014. Vol. 1, pp. 272–279.

- Zvezdin A.V. Technology for obtaining sungulite and vermiculite concentrates from overburden rocks of the Kovdor phlogopite vermiculite deposit. *Vestnik ISTU*, 2015, vol. 8, pp. 93–99. In Rus.
- Vibratsii v tekhnike: spravochnik. T. 4. Vibratsionnye protsessy i mashiny [Vibration in engineering: handbook. Vol. 4. Vibration processes and machines]. Ed. by E.E. Lavendel. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 509 p.
- 15. Harris C.M., Piersol A.G. *Harris' shock and vibration handbook*. New York, McGraw-Hill Professional, 1460 p.
- Ahirrao N.S., Bhosle S.P., Nehete D.V. Dynamics and Vibration Measurements in Engines. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 434-439.
- Rashad A.M. Vermiculite as a construction material a short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 2016, vol. 125, pp. 53–62.

- Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used. Ed. by J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. 1529 p.
- Vajnson A.A. Podemno-transportnye mashiny [Hoisting and transport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 431 p.
- Gornaya entsiklopediya [Mountain encyclopedia]. Available at: http://www.mining-enc.ru (accessed 25 June 2018).
- Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics]. Ed. by N.B. Dortman. Moscow, Nedra Publ., 1984. 455 p.
- Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Kuvshinov K.A. Technological complex for vermiculite concentrates and conglomerates processing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, *Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 74–86. In Rus.

Received: 12 November 2018.

#### Information about the authors

Anatoly I. Nizhegorodov, Dr. Sc., professor, 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.

УДК 69.058.8

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖИВУЧЕСТИ ЗАЩИЩЕННЫХ ОТВЕТСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Однокопылов Георгий Иванович<sup>1</sup>,

OGIz@yandex.ru

## Кумпяк Олег Григорьевич<sup>2</sup>,

OGKumpyak@yandex.ru

## Галяутдинов Заур Рашидович<sup>2</sup>,

GaZR@yandex.ru

## Галяутдинов Дауд Рашидович<sup>2</sup>,

DaudG@yandex.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

**Актуальность** работы связана с тенденцией возникновения чрезвычайных ситуаций аварийного характера на предприятиях нефтегазовой промышленности. В связи с чем необходимо проектировать железобетонные конструкций, на которые возможно воздействие интенсивных кратковременных динамических нагрузок аварийного типа, носящих ударно-волновой характер. Учет реакции распора при проектировании позволяет выявить скрытые запасы несущей способности в изгибаемых железобетонных конструкциях, а также снизить трещинообразование, за счет увеличения жесткости. Эффективным способом снижения величины динамического воздействия является применение податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения. Таким образом, совместное применение податливых опор и учет реакции распора дает возможность предотвратить повреждения, полное или частичное разрушение конструкций. Кроме того, повреждения строительных конструкций ответственных зданий и сооружений нефтегазового комплекса приводят к остановке технологического процесса, что в ряде случаев не только экономически не выгодно, но и недопустимо, а также может привести к значительному материальному ущербу и гибели людей.

**Цель:** разработать методику и алгоритм построения энергетической диаграммы, выполнить числовую оценку применения податливых опор на живучесть защищенных строительных конструкций при интенсивном нагружении

**Методы:** экспериментальные исследования: реакция входного силового воздействия, реакция выходного силового воздействия, ускорения, перемещения методами тензометрии, численное интегрирование методом Симпсона.

**Результаты.** Разработана методика и алгоритм построения усредненной энергетической диаграммы. Выполнена числовая оценка применения податливых опор на живучесть защищенных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса при кратковременном динамическом нагружении.

#### Ключевые слова:

Живучесть, защищенная строительная конструкция, энергетическая диаграмма, коэффициент результирующей силы, кратковременное динамическое нагружение, ударно-волновое нагружение, железобетон, распор, податливые опоры, силы инерции, экспериментальные исследования.

### Актуальность исследования

При эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли всегда существует возможность возникновения серьезных чрезвычайных происшествий, аварий, технических инцидентов, а также несчастных случаев, в том числе со смертельным исходом. Подобные процессы, как правило, проявляются в форме разрушения или значительного повреждения зданий и сооружений [1-5]. Происходит это обычно из-за взрывных процессов и последующих выбросов горячих и токсичных веществ, которые зачастую не поддаются контролю.

На территории РФ природный газ применяется в качестве одного из самых доступных и дешевых источников топлива для функционирования электростанций, теплоцентралей, котельных и компрессорных, что требует повсеместного строительства объектов газовой промышленности. Возникновение аварийной ситуации приводит к выходу объекта из строя и последующей приостановке или полному прекращению газоснабжения.

Основными техническими причинами аварий объектов нефтегазовой промышленности можно считать: повреждения и дефекты в конструкциях зданий, технические проблемы с оборудованием, отклонения от проектных решений в процессе строительства и монтажа опасного производственного объекта, высокий износ оборудования, недостаточный уровень внедрения новых технологий, низкое оснащение производства автоматическими системами, активность коррозионных процессов, низкий уровень средств оперативной связи и сигнализации.

Поэтому авторами предложено применение защищенных строительных конструкций в составе объектов нефтегазового комплекса с обеспечением и контролем степени живучести при действии ударно-волнового нагружения, не приводящего к полному разрушению строительной конструкции, с возможностью ее дальнейшей эксплуатации.

Повышенное внимание при проектировании объектов данной отрасли должно уделяться совершенствованию методов расчета и анализу напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений при воздействии кратковременных динамических нагрузок аварийного характера [6–18].

В процессе анализа аварийных кратковременных динамических воздействий, необходимого для выработки оптимальных конструктивных решений зданий и сооружений, существуют трудности по определению параметров действующей нагрузки и выявлению истинных коэффициентов запаса прочности конструкций.

Применение методов теории живучести технических систем [19–27] и статических и динамических оценок функционирования объектов позволяет точнее определить остаточный ресурс строительных конструкций, а также зданий и сооружений после воздействий сверхнормативных динамических нагрузок.

Известные методы оценки для статических нагрузок хорошо проработаны. При действии кратковременных динамических нагрузок и оценке всех параметров должно быть учтено время воздействия, а следовательно, необходимо осуществлять контроль изменения всех факторов в процессе времени воздействия, что создает определенные сложности по применению стандартных методов, используемых при статических нагружениях [28–31].

В работе представлена методика оценки живучести защищенных ответственных строительных конструкций нефтегазового комплекса при интенсивном динамическом нагружении. В качестве примера приведен анализ результатов испытаний железобетонной балки при действии кратковременной динамической нагрузки, а также железобетонной балки с распором на податливых опорах при действии кратковременной динамической нагрузки. Для оценки живучести конструкций впервые были получены следующие коэффициенты: коэффициент силового воздействия k<sub>Fdd</sub>; энергетический коэффициент k<sub>E.med</sub>, коэффициента энергоемкости податливой опоры  $k_{E,lex.b}$ . Данные коэффициенты позволяют провести численный анализ испытаний конструкций и подтвердить положительное влияние использования податливых опор и учета распора.

При проведении практически любых испытаний на динамическую нагрузку (с видами воздействий: взрывное, ударное, сейсмическое) предполагается наличие узлов входного и выходного контроля параметров действующей нагрузки. Как правило, это различные силоизмерители тензометрического типа.

При обработке экспериментальных результатов использована методика оценки параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении [32] для ответственных строительных конструкций. В статье представлены результаты испытаний изгибаемых железобетонных балок при действии кратковременной динамической нагрузки в условии ограниченного горизонтального смещения на податливых опорах. Все реальные изгибаемые конструкции (плиты, балки, ригеля) (рис. 1) имеют в опорной части связи (заанкеривание элементов на опорах, замоноличивание зазоров между торцами элементов), которые препятствуют горизонтальному смещению опорных сечений при нагружении и приводят к возникновению распора и соответственно увеличению несущей способности.

При динамическом воздействии влияние распора на сопротивление конструкций неоднозначно: с одной стороны, наличие горизонтальной реакции повышает несущую способность элемента, а с другой - снижает его деформативность, что ведет к снижению пластической стадии деформирования. Данный вопрос рассмотрен в работах: Н.Н. Попова и Б.С. Расторгуева [33-36], Т.Н. Виноградовой [37], А.М. Зулуева [38, 39], И.Н. Тихонова [40, 41], L. Huynh [42], О.Г. Кумпяка, З.Р. Галяутдинова, Д.Р Галяутдинова [43]. Явление распора необходимо учитывать, так как при действии нагрузок аварийного характера в конструкциях в ряде случаев допускается работа арматуры за пределами упругости, что приводит к увеличению деформаций растянутой зоны и, соответственно, росту горизонтальной реакции.

Использование податливых опор приводит к повышению сопротивления конструкций зданий и сооружений действию динамических нагрузок. Результаты экспериментальных исследований изгибаемых конструкций [44–52] на податливых опорах показывают высокую эффективность их применения при действии динамических нагрузок большой интенсивности. При этом наибольший эффект наблюдается при деформировании опор в упругопластической стадии.

Таким образом, использование податливых опор и учет ограничения горизонтального смещения для строительных конструкций требует дальнейшего изучения и с целью применения в промышленных зданиях и сооружениях, в том числе в нефтегазовом комплексе.

В работе применялись средства для обеспечения защиты строительных конструкций при нагрузках аварийного характера. Необходимо отметить, что развитие реакции распора в реальных конструкциях реализуется автоматически при деформировании, за счет наличия элементов, ограничивающих смещения опорной зоны в горизонтальном направлении. Наличие податливой опоры и своевременная замена после исчерпания несущей способности дает возможность поглощения энергии удара, обеспечения живучести конструкции и возможность дальнейшей эксплуатации.



Рис. 1. Типичный узел сопряжения строительных конструкций с применением податливых опор и учетом реакции распора: 1 – железобетонная плита; 2 – железобетонная колонна; 3 – железобетонный риель; 4 – податливая опора

Fig. 1. Typical coupling assembly of building structures using ductile supports and considering the reaction thrust: 1 is the reinforced concrete slab; 2 is the reinforced concrete column; 3 is the reinforced concrete riel; 4 is the yielding support

#### Экспериментальные исследования

Для оценки параметров нагружения и напряженно-деформированного состояния железобетонных балок при интенсивном динамическом нагружении были произведены испытания двух конструкций: БД-1 и БДРП-2. Шифр образца балки указывает на следующие параметры: тип нагружения «Д» – интенсивное динамическое; наличие распора «Р»; наличие податливых опор «П». Например, балка БДРП-2 расшифровывается как балка «Б», испытанная динамической нагрузкой «Д» с учетом распора «Р» на податливых опорах «П». Таким образом в представленных испытаниях варьировалось наличие распора и податливых опор.

Армирование выполнено пространственным каркасом как для образца БД-1, так и для БДРП-2. В качестве поперечной арматуры использована холоднодеформированная арматура  $\varnothing 5$  мм класса Вр500, установленная с шагом 50 мм в приопорной зоне и 130 мм в середине пролета; а в качестве продольной – горячекатаная арматура % 6 мм класса А240 в сжатой зоне и % 10 мм класса А500 в растянутой зоне. Для усиления торцовых участков балок использованы сетки с ячейкой  $50 \times 50$  мм из холоднодеформированной арматуры % 5 мм класса Вр500 по 7 сеток с каждой стороны и установлен уголок  $100 \times 10$  мм.

Для испытаний на конструкции (поз. 1) был размещен комплекс измерительных приборов (рис. 2):

- для определения перемещений индуктивные датчики перемещения Waycon серии RL150 (поз. 2);
- для измерения ускорений акселерометры (DHE 100023) (поз. 3);
- для определения входного силового воздействия – датчик силоизмерительный тензоризисторный ДСТ 4126 (поз. 4);
- для определения выходного силового воздействия – датчик силоизмерительный тензоризисторный ДСТ 4126 в количестве 2 шт. на каждую опору (поз. 5).

Для реализации экспериментальных исследований был разработан и изготовлен стенд (рис. 3).

Испытываемая железобетонная балка устанавливается на динамометрические опоры, обеспечивающие шарнирное опирание. Опоры закрепляются на силовом полу, затем создается начальное продольное усилие (распор) гидродомкратом через систему траверс, соединенных направляющими (рис. 3). Податливые опоры размещались в опорных устройствах (рис. 2). Нагрузка прикладывалась в третях пролета, через распределительную траверсу, для выделения зоны чистого изгиба и разрушения по нормальному сечению, согласно рекомендациям ГОСТ 10180–2012.



Рис. 2. Схема расстановки измерительных приборов при испытании железобетонных балок (конструкция, обеспечивающая развитие реакции распора Н, условно не показана): 1 – железобетонная балка; 2 – датчики перемещения; 3 – акселерометры; 4 – силоизмеритель для измерения выходного силового воздействия; 5 – силоизмеритель для измерения выходного силового воздействия (опорной реакции); 6 – податливая опора; 7 – распределительная траверса

Fig. 2. Scheme of arrangement of measuring instruments for testing reinforced concrete beams (the design providing the development of the reaction of the thrust H is not shown): 1 is the reinforced concrete beam; 2 are the displacement sensors; 3 are the accelerometers; 4 is the dynamometer for measuring the input force; 5 is the dynamometer for measuring the output force action (reference reaction); 6 is the yielding support; 7 is the distribution traverse

Визуализации картины развития трещин в момент достижения предельной нагрузки в процессе кратковременного динамического нагружения выполнена с применением высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA-2 с частотой съемки 2500 кад/с (рис. 4, *a*).

Датчик для измерения нагрузки, создаваемой падающим грузом, устанавливался по центру ра-



спределительной траверсы сверху образца. С целью увеличения времени действия нагрузки на датчик сверху устанавливался комплект резиновых прокладок (их наличие, толщина и количество обусловлено целями конкретного исследования). Датчики для измерения опорных реакций устанавливались попарно в каждую из специально сконструированных опор. Общий вид измерительного оборудования приведен на рис. 4.

- Рис. 3. Стенд для испытания железобетонных балок при динамическом нагружении с распором на податливых опорах: 1 – силовой пол; 2 – железобетонная балка; 3 – силомер для определения входного силового воздействия; 4 – груз; 5 – ограничительный контур, представленный двумя тяжами, соединенными между собой траверсами, для включения в работу реакции распора (H); 6 – распределительная траверса
- Fig. 3. Stand for testing reinforced concrete beams under dynamic loading with a spread on flexible bearings: 1 is the power field; 2 is the reinforced concrete beam; 3 is the dynamometer for determining the input power action; 4 is the cargo; 5 is the limiting circuit shown two strands interconnected by cross members to enable the work of the thrust reaction (H); 6 is the distributive traverse

Для регистрации показаний датчиков в процессе экспериментальных исследований использовались сертифицированные измерительные системы MIC-036R и MIC-300M (рис. 5), все датчики были подключены к ним через экранированные кабели.

#### Результаты экспериментальных данных

После проведения эксперимента зарегистрированные данные со всех измерительных приборов преобразовывались в формат Microsoft Excel с по-





a/a)



- **Рис. 4.** Общий вид измерительного оборудования: а) высокоскоростная камера Photron Fastcam SA-2; б) конструкция для измерения выходного силового воздействия (опорной реакции); в) силоизмеритель для измерения входного силового воздействия; г) датчик перемещения; д) акселерометр
- Fig. 4. General view of measuring equipment: a) high-speed camera Photron Fastcam SA-2; b) design for measuring the output force action (reference reaction), c) dynamometer for measuring the input force action; d) displacement sensor accelerometer



Puc. 5. Измерительно-вычислительные комплексы MIC-036R, MIC-300M Fig. 5. Measuring-computing complexes MIC-036R, MIC-300M



Рис. 6. Изменение входного (а) и выходного (б) силового воздействия во времени для образцов БД-1, БДРП-2

Fig. 6. Change in input (a) and output (b) force effects in time for the samples BD-1, BDTF-2

следующей их обработкой. С целью сопоставления результатов испытаний образцов серии БД-1 и БДРП-2 построены диаграммы: изменение входного силового воздействия во времени (рис. 6, *a*), изменение выходного силового воздействия во времени (рис. 6,  $\delta$ ), изменение перемещений во времени (рис. 7). На рис. 7 представлены две диаграммы, полученные в результате испытания соответствующих образцов БД-1 и БДРП-2\*, а также диаграмма БДРП-2, которая отражает перемещения конструкции без учета движения податливой опоры. Следует отметить, что для образца БД-1 диаграмма движения податливых опор отсутствует (в данном эксперименте податливые опоры не применяются).

В результате анализа полученных данных по перемещению (рис. 7) при интенсивном динамическом нагружении опытных образцов при равнозначных параметрах загружения (высота падения груза 0,75 м, масса груза составляла 450 кг) установлено, что использование податливых опор и учет реакции распора приводит к значительному снижению трещинообразования, тем самым обеспечивая живучесть испытуемых конструкций (рис. 7, 8), что подтверждается при раскадровке видеоряда с высокоскоростной камеры, на рис. 8 представлены фотографии при максимальном значении перемещений конструкций.



Рис. 7. Изменение перемещений в середине пролета во времени для образцов БД-1, БДРП-2 (БДРП-2\* – совместное перемещение конструкции и податливых опор)



Анализ показаний перемещений во времени показывает, что наличие распора и использование податливых опор в образце БДРП-2 приводит к снижению прогибов конструкции в середине пролета в 5,4 раза относительно образца БД-1 (рис. 7). Снижение перемещений конструкции связанно с деформированием податливых опор, а также с увеличением продольной жесткости образца за счет включения в работу реакции распора в процессе интенсивного динамического нагружения.





Рис. 8. Трещинообразование образцов БД-1(а) и БДРП-2(б)

Fig. 8. Pattern of cracks development in samples BD-1 (a) and BDTF-2 (b)

Оценив изменение входного силового воздействия во времени при кратковременном динамическом нагружении (рис. 6, *a*), можно сделать следующие выводы: наличие распора в образце БДРП-2 приводит к снижению реакции системы на 44 %, причем время достижения максимального значения реакции несколько увеличилось за счет деформирования податливых опор; аналогично наблюдается увеличение времени достижения пиковых значений величины опорной реакций (рис. 6, *б*).

## Анализ параметров кратковременного динамического нагружения

Для оценки параметров кратковременного динамического нагружения использована методика, предложенная в работе [2]. С целью упрощения анализа напряженно-деформированного состояния временная шкала действия силы представлена в «мс», а шкала значений силы переведена в относительные единицы путем деления каждого показания всех датчиков на максимальную зафиксированную величину нагрузки:

Определение мгновенного значения коэффициента результирующей силы  $_{k}(t)$ , приведенное на рис. 9, производится путем нахождения разности между мгновенным значением силы (рис. 6, *a*) и суммарным мгновенным значением опорной реакции (рис. 6,  $\delta$ ), деленной на максимальное значение силы для соответствующей серии испытаний:

$$k(t) = \frac{q_s(t) - \sum_{i=1}^{n} q_{op,i}(t)}{q_{s,\max}},$$
 (1)

где k(t) — мгновенное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении;  $q_s(t)$  — мгновенное значения кратковременной динамической нагрузки при сверхнормативном ударном воздействии по пока-

заниям силоизмерителя;  $\sum_{i=1}^{n} q_{op,i}(t)$  – суммарное

мгновенное значение опорной реакции;  $q_{s,\max}$  – максимальное значение динамической нагрузки приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя.

Физический смысл формулы (1) заключается в определении вертикальной составляющей испытательной нагрузки в функции времени, приложенной к испытуемой строительной конструкции и выраженной в относительных единицах (рис. 9).

Определение усредненного значения коэффициента результирующей силы производится по следующей зависимости:

$$k = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t) - \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} q_{op\,i}(t)}{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t)},$$
(2)

где k — усредненное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении на интервале времени  $t_1$ - $t_2$ ;  $t_1$ ,  $t_2$  — метки времени начала и окончания ударного воздействия.

Значения мгновенного коэффициента результирующей силы (1) для образца БД-1 изменяются в пределах от +0,77 до -0,63; для образца БДРП-2 – в пределах от +0,86 до -1,9 (рис. 9). При этом знак»+» характеризует превышение входной нагрузки над опорной реакцией, а знак «-» наоборот.

Усредненное значение коэффициента результирующей силы определяется по зависимости (2). Для образцов БД-1, БДРП-2 они равны соответственно  $k_{\rm Ed}$ =0,089;  $k_{\rm EdPII}$ =0,72. Усредненный коэффициент результирующей силы отражает долю энергии, затраченной на деформирование материала и выделение тепла в процессе испытания строительной конструкции на кратковременную динамическую сверхнормативную нагрузку. Таким образом, получен коэффициент увеличения затраченной энергии на деформирование образца БДРП-2 по отношению к образцу БД-1:

$$k_E = \frac{k_{\text{БДРП}}}{k_{\text{БЛ}}} = \frac{0,72}{0,089} = 8,08$$
, и его физический смысл

заключается в том, что в 8,08 раза снижена сила, которая могла пойти на разрушение образца, но которая аккумулируется в податливой опоре, выполняющей роль защитного элемента и защищающей строительную конструкцию.

Рассмотрим вычисление сил инерции, полученных по результатам испытаний образца БД-1 с акселерометрами, расположенными по длине конструкции с шагом 300 мм. Для вычисления сил инерции во времени просуммируем произведения



Рис. 9. Графики зависимости относительных и абсолютных значений входного силового воздействия и суммарной опорной реакции от времени, а также графики изменения мгновенных значений коэффициента результирующей силы k(t) и результирующей силы F<sub>res</sub>(t) в процессе испытания образцов БД-1 и БДРП-2. Обозначения: 1 – область превышения кратковременной динамической нагрузки; 2 – область превышения опорной реакции исистемы

Fig. 9. Graphs of dependence of relative and absolute values of the input force action and the total reference reaction on time, as well as the graphs of instantaneous values of the resultant force k(t) and the resultant force  $F_{res}(t)$  during the testing of the BD-1 and BDTF-2 samples. Legend: 1 is the area of exceeds of short-term dynamic load; 2 is the area of exceeding the reference reaction of the system

показаний акселерометров на массу соответствующего участка конструкции (рис. 10):

$$F_{I}(t) = \sum_{i=1}^{n} \int_{t_{i}}^{t_{2}} m_{i} \dot{a}_{i}(t), \qquad (3)$$

где  $F_i(t)$  – сила инерции;  $m_i$  – масса участка конструкции, соответствующей расположению акселерометров; n – количество акселерометров;  $a_i(t)$  – ускорения части конструкции, зафиксированные соответствующими акселерометрами.

	<i>m</i> <sup>1</sup> •	m	2	<i>m</i> <sub>3</sub>	<i>П</i> 4		<i>m</i> <sub>5</sub>	
0	U	a,(t)	a2/11	<b>L</b> []	111 4	as(t)	<u>a<sub>5</sub>(t)</u>	U
	500	3	00	300	300	1	500	_
	300	300	300	,	300	300	300	

Рис. 10. Схема разграничения образца с учетом расстановки акселерометров по длине

Fig. 10. Scheme of the sample demarcation taking into account the arrangement of accelerometers along the length

В результате можем вычислить по формуле (3) величину силы инерции балки на всем интервале действия нагрузки. Вычтем график распределения величины силы инерции во времени (график 2: черный цвет) на рис. 11 из графика входного силового воздействия (график 1: зеленый цвет) для образца серии БД-1. На рис. 11 представлена диаграмма деформирования арматуры 3 (синий цвет).

График 4 (фиолетовый цвет) характеризует развитие сил, связанных с деформированием образца  $F_{del}(t)$ , получен путем вычитания графиков 1 и 2.

Как видно из полученных диаграмм (рис. 11), на первом временном интервале  $t_0=0$  мс до  $t_1=2,68$  мс абсолютные значения разности между мгновенными показаниями силоизмерителя (график 1) совпадают с силами инерции, полученными экспериментально (график 2), что свидетельствует об упругой работе в ходе ударно-волнового нагружения и согласуется с упругими деформациями в рабочей арматуре в середине пролета (график 3) на рассматриваемом интервале. Дальнейшее расхождение графиков (заштрихованная область) отражает затраты силового воздействия на деформирование конструкции в пластической стадии, временной интервал от  $t_1=2,68$  мс до  $t_2=18,81$  мс. Таким образом, по зависимости (4) можно разграничить стадии деформирования конструкции на временном отрезке силового воздействия, а также количественно оценить величину ударно-волнового нагружения, направленного на деформирование образца:

$$F_{def}(t) = q_s(t) - F_I(t) = q_s(t) - \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t_i} m q_i(t).$$
(4)



Рис. 11. Графики зависимости входного силового воздействия q<sub>s</sub>(t) для образца серии БД-1 (график 1) и распределения сил инерции F<sub>1</sub>(t) системы (график 2); диаграмма деформирования рабочей арматуры в середине пролета конструкции (график 3); диаграмма развития усилий, связанных с деформированием образца F<sub>def</sub>(t) (график 4)

Fig. 11. Graphs of dependence of the input force action  $q_s(t)$  for the sample of the BD-1 series (graph 1) and distribution of the inertia forces  $F_1(t)$  of the system (graph 2); diagram of deformation of the working reinforcement in the middle of the span of the structure (graph 3); diagram of development of forces associated with sample deformation  $F_{def}(t)$  (graph 4)

Аналогично образцу БД-1 на рис. 11 построены графики для образца серии БДРП-2 (рис. 12). Необходимо отметить, что при вычислении сил инерции не учитывалась погрешность распределения масс, связанных с наличием ограничительного контура, вызывающего реакцию распора, за счет возможности поворота в шарнирном сопряжении торца балки с обеих сторон.



Рис. 12. Графики зависимости входного силового воздействия q<sub>s</sub>(t) для образца серии БДРП-2 (график 1) и распределения сил инерции F<sub>1</sub>(t) системы (график 2); диаграмма развития усилий, связанных с деформированием образца F<sub>def</sub>(t) (график 3)

Fig. 12. Graphs of dependence of the input force action  $q_s(t)$  for a sample of the BDTF-2 series (graph 1) and distribution of the inertia forces  $F_1(t)$  of the system (graph 2); diagram of development of forces associated with deformation of the sample  $F_{def}(t)$  (graph 3)

Сравним график 4 рис. 11 с графиком 3 рис. 12. В результате сравнения можно вычислить коэффициент разброса силового воздействия  $k_{Fdel}$ , отражающий отклонение импульса сил, связанных с деформированием образца БДРП-2 относительно БД-1 при равных параметрах ударно-волнового нагружения (высота падения груза 0,75 м, масса груза 450 кг). Для этого вычислим интеграл функций графика 4 рис. 11 и графика 3 рис. 12.

$$S_{\text{B}\text{J}} = \int_{t_1}^{t_2} F_{def}(t) = 1321 \text{ kH} \cdot \text{mc};$$
  

$$S_{\text{B}\text{J}\text{P}\Pi} = \int_{t_1}^{t_2} F_{def}(t) = 1389 \text{ kH} \cdot \text{mc};$$
  

$$k_{F_{def}} = \frac{S_{\text{B}\text{J}\text{P}\Pi} - S_{\text{B}\text{J}}}{S_{\text{B}\text{J}\text{P}\Pi}} \cdot 100 \% = 4,9 \%$$

Физический смысл коэффициента разброса силового воздействия  $k_{F_{def}}$  заключается в отклонении импульса силы, приложенной к образцу, защищённому податливой опорой (БДРП-2), по отношению к

образцу БД-1 без соответствующей защиты, при равных параметрах ударного нагружения (падения груза 750 мм, масса груза 450 кг), фактически это погрешность получения экспериментальных данных измерения, вызванная неидентичностью образцов в связи особенностями технологического процесса бетонирования и анизотропностью бетона.

Для сравнительного анализа процессов при ударно-волновом нагружении в конструкциях БД-1 (оранжевый цвет) и БДРП-2 (фиолетовый цвет) представлен спектральный состав на рис. 13. Амплитудные значения сигналов А по оси ординат приведены в относительных единицах [о.е.], полученных путем деления на максимальное значение амплитуды для образца БДРП-2. По оси абсцисс обозначена частота v [Гц].



Рис. 13. Спектральный состав показаний акселерометра, расположенного в середине пролета для экспериментальных образцов БД-1 и БДРП-2

Fig. 13. Spectral composition of the testimony of an accelerometer located in the middle of the span for experimental samples BD-1 and BDTF-2

Как видно из рис. 13, для образца БД-1 можно наблюдать наличие нулевой гармоники колебаний конструкции, что хорошо согласуется с положительными значениями диаграммы развития усилий, связанных с деформированием образца  $F_{def}(t)$ (рис. 11, график 4). Для образца БДРП-2 наблюдается колебательный процесс, что согласуется с рис. 12, график 3. На графиках рис. 13 можно наблюдать практическое совпадение пиков частот первых колебаний v<sub>1</sub>=19,62 Гц и v<sub>3</sub>=21,03 Гц, которые характеризуют частоту работы испытательного стендового оборудования, включающую в состав конструкцию, подвергнутую ударно-волновому нагружению. Вторые пики спектрального состава  $v_2$ =58,85 Гц и  $v_4$ =82,77 Гц связаны с колебаниями непосредственно первой гармоники испытуемой конструкции. Их различие свидетельствует об итоговом снижении несущей способности конструкции во время испытания для образца БД-1 без податливых опор относительно образца БДРП-2.

Для получения усредненной энергии деформирования на интервале действия нагрузки умножим  $F_{del}(t)$  на усредненные перемещения конструкции по длине элемента:

$$E_{med}(t) = F_{def}(t) f_{med}(t), \qquad (5)$$

30 t. MC 35

20

где  $E_{med}(t)$  – усредненная энергия деформирования на интервале действия нагрузки;  $F_{del}(t)$  – сила, затраченная на деформирование образца;  $f_{med}(t)$  – усредненные перемещения образца по длине на интервале действия сверхнормативного силового воздействия (среднее значение перемещений во времени по длине образца).

По представленной выше зависимости (5) построены усредненные энергетические диаграммы для образцов серии БД-1 и БДРП-2.



Рис. 14. Диаграмма усредненной энергии деформирования во времени для образцов серии БД-1 (а, график 1) и БДРП-2 (б, график 2); диаграмма усредненной энергии деформирования податливой опоры во времени для образца БДРП-2 (б, график 3); диаграмма усредненной энергии деформирования образца без учета смятия податливой опоры во времени для образца БДРП-2 (б, график 4)

Fig. 14. Diagram of averaged deformation energy in time for samples of series BD-1 (a, graph 1) and BDTF-2 (b, graph 2); diagram of the averaged deformation energy of the yielding support in time for the sample BDTF-2 (b, graph 3); diagram of the average deformation energy of the sample without taking into account the crushing of the yielding support in time for the sample BDTF-2 (b, graph 4)



Рис. 15. Блок-схема алгоритма для построения энергетической диаграммы для балок без податливых опор (БД-1), а также при их наличии (БДРП-2)

Fig. 15. Block diagram of the algorithm for constructing energy diagram for beams without flexible bearing (BD-1), as well as in their presence (BDTF-2)

Из энергетических диаграмм (рис. 14) видно, что максимальное значение энергии  $E_{med}^{\text{BA}}=1050$  Дж – для конструкции серии БД-1 и  $E_{med}^{\text{BAP1}}=1150$  Дж – для конструкции серии БДРП-2. Причем для образца БДРП-2 на рис. 13, б отражено перераспределение энергии, приходящейся на деформирование конструкции  $E_{med,c}^{\text{BAP1}}=195$  Дж, и энергии, приходящейся на деформирование податливой опоры  $E_{med,f}^{\text{BAP1}}=950$  Дж. Таким образом, увеличение значений энергий, затраченных на деформирование балки, можно охарактеризовать энергетическим коэффициентом

$$k_{E,med} = \frac{E_{med}^{B\Pi}}{E_{med,c}^{B\Pi P\Pi}} = \frac{1050 \ \Pi \Re}{195 \ \Pi \Re} = 5,38,$$

физический смысл которого заключается в том, что энергия, приложенная к конструкции в испытании образца серии БДРП-2, сократилась в 5,38 раз, за счет энергопоглощения податливой опорой, причем величина коэффициента энергоемкости податливой опоры составила

$$k_{E,flex,b} = \frac{E_{med,f}^{\text{BJPII}}}{E_{med}^{\text{BJPII}}} = \frac{950 \text{ Дж}}{1150 \text{ Дж}} = 0,826.$$

На рис. 15 приведен разработанный алгоритм, представленный в виде блок-схемы для обработки экспериментальных данных железобетонных балок на податливых опорах с распором, в частности получение усредненной энергетической диаграммы, а также перераспределение энергии между конструкцией и податливыми опорами.

#### Выводы

- 1. Разработан алгоритм построения усредненной энергетической диаграммы на основе экспериментальных данных, и получены аналитические зависимости для оценки влияния податливости опор.
- 2. Предложена методика оценки применения податливой опоры в образце БДРП-2 по сравнению с образцом БД-1 без податливой опоры с помощью энергетического коэффициента k<sub>E,med</sub>=5,38, иллюстрирующего снижение энергии, затраченной на деформирование конструкции, за счет перераспределения энергии между конструкцией и податливой опорой при равных параметрах ударного нагружения (высота падения груза 750 мм, масса груза 450 кг).

- 3. Получена оценка энергоемкости использования податливой опоры при испытаниях серии БДРП-2, в результате установлено, что 82,6 % энергии было поглощено за счет использования податливых опор.
- 4. Получен коэффициент разброса силового воздействия k<sub>Fdef</sub>=4,9 %, который характеризует отклонение интегрального значения силы, приложенной к образцу, защищённому податливой опорой (БДРП-2), по отношению к образцу БД-1 без соответствующей защиты, при равных параметрах ударного нагружения (падения груза 0,75 м, масса груза 450 кг), это позволяет оценить погрешность, связанную с неидентичностью образцов и анизатропностью бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 4 / В.А. Котляревский, А.В. Забегаев, Ю.Н. Глазунов, А.А. Петров / под ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 204 с.
- Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. – 594 с.
- Тамразян А.Г. Оценка живучести зданий при комбинированных аварийных воздействиях // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 10. – С. 39–41.
- Тонких Г.П. По вопросу использования динамических испытаний для оценки технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений // Мониторинг. Наука и безопасность. 2012. № 4 (8). С. 54–58.
- Pakhmurin O.R. Prevention of uncontrolled progressive collapse of a high-rise brick building // Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects: IV International Young Researchers Conference. Tomsk, 2017. - V. 143. - 6 p.
- Балдин И.В. Исследование железобетонных коротких цилиндрических оболочек покрытий при кратковременном динамическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1994. – 334 с.
- Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, В.С. Плевков, А.А. Югов, В.В. Шашков, К.Л. Кудяков, А.М. Устинов. Модель динамического разрушения фибробетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 5 (46). – С. 63–76.
- Педиков А.В. Исследование сжато-изгибаемых железобетонных балочных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 174 с.
- Плевков В.С., Колупаева С.Н., Кудяков К.Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // Вестник Томского государственного архитектурностроительного университета. – 2016. – № 3 (56). – С. 95–110.
- Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5 (58). С. 91–101.
- Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К оценке прочности железобетонных изгибаемых элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 112–122.

- Получены мгновенные значения и усредненное значение коэффициентов результирующей силы с применением податливой опоры в образце БДРП-2 и без податливой опоры в образце БД-1, которые составили соответственно k(t)=+0,77...-0,63, k=0,089 – для балки серии БД-1; k(t)=+0,86...-1,9, k=0,72 – для балки серии БДРП-2.
- Получен коэффициент увеличения затраченной энергии на деформирование образца БДРП-2 по

отношению к образцу БД-1:  $k_{E} = \frac{k_{\text{БДРП}}}{k_{\text{БЛ}}} = 8,08,$ 

причем сила, которая могла пойти на разрушение образца, аккумулируется в податливой опоре, выполняющей роль защитного элемента.

- Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. 550 с.
- СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция. – М.: НИИЖБ им Гвоздева А.А., 2014. – 156 с.
- Study of deformations evolution in near-surface layers of adhesive joints / A. Ustinov, D. Kopanitsa, Yu. Abzaev, A. Klopotov, B. Koshko, G. Kopanitsa // 3<sup>rd</sup> International Young Researchers Conference on Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. Tomsk, 2018. V. 1800. 7 p. DOI: 10.1063/1.4973048
- Strength calculation for fiber concrete slabs under high velocity impact / A. Ustinov, D. Kopanitsa, N. Belov, N. Yugov, A. Yugov, B. Koshko, G. Kopanitsa // 3<sup>rd</sup> International Young Researchers Conference on Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. – Tomsk, 2018. – V. 1800. – 6 p. DOI: 10.1063/1.4973049
- Kudyakov K.L., Plevkov V.S., Nevsky A.V. Strength and deformability of concrete beams reinforced by non-metallic fiber and composite rebar // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 71. P. 2–7.
- Experimental and numerical investigation of concrete structures with metal and non-metal reinforcement at impulse loadings / P.A. Radchenko, S.P. Batuev, A.V. Radchenko, V.S. Plevkov, K.L. Kudyakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics. - 2016. -V. 774. - P. 2-8.
- Mechanical properties of composite rebar under static and shortterm dynamic loading / V.S. Plevkov, I.V. Baldin, K.L. Kudyakov, A.V. Nevskii // AIP Conference Proceedings. – Tomsk, 2017. – V. 1800. – 2–6 pp. DOI: 10.1063/1.4973059
- Стекольников Ю.И. Живучесть систем. СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – № 1. – P. 1–6. – Article number 012015.
- Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014. - V. 66. - № 1. - P. 1-7. - Article number 012035.
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - V. 698. - P. 24-29.
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proc. – Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 1–5.

- Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIB-CON): Proc. – Omsk, May 21–23, 2015. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2015. – P. 140–144.
- Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes // 2016 The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST): Proc. – Novosibirsk, June 1–3, 2016. – Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2016. – P. 140–144.
- Influence of Design Methods a Discrete Model of Separately Excited DC Motor on Parameters Estimation / I. Vajda, A. Glazyrin, I. Ustinova, E. Bolovin // Acta Polytechnica Hungarica. 2018. V. 15. № 6. P. 219–233.
- Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационом электромагнитном активаторе / А.Н. Гварилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213. DOI: 10.18799 /24131830/2019/1/70
- Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1578–1579.
- Tensile behavior of concrete under high loading rates / J. Ozbolt, A. Sharma, B. Irhan, E. Sola // Int. J. of Impact Eng. - 2014. -V. 69. - № 5. - P. 55-68.
- 30. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels / J.H. Kim, D. Kim, Han Heung Nam et al. // Materials Science & Engineering A. - 2013. - № 559. - P. 222-231.
- Shang S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete // Construction and Building Materials. - 2013. - V. 40. - № 2. - P. 322-329.
- Однокопылов Г.И., Саркисов Д. Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
- Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 190 с.
- 34. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаев А.В Расчет конструкций на динамические специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992. – 319 с.
- 35. Расторгуев Б.С. Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – № 4. – С. 45–48.
- 36. Расторгуев Б.С. Применение динамических гасителей колебаний при взрывных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 1. – С. 50–57.
- 37. Виноградова Т.Н. Влияние распора на работу железобетонных балочных конструкций при кратковременных динамических воздействиях: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977. – 155 с.
- Зулпуев А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных распорных плит перекрытий в зданиях с монолитными стенами: монография. – Бишкек: Илим,

2010. – 80 c.

- Зулпуев А.М., Бактыгулов К. Расчет на прочность сборных железобетонных плит перекрытий, опертых по контуру // Территория науки. – 2016. – Т. 1. – С. 63–68.
- 40. Тихонов И.Н. Принципы расчета прочности и конструирования армирования балок перекрытий зданий из монолитного железобетона для предотвращения прогрессирующего разрушения // Научно-технический и производственный журнал «Жилищное строительство». – 2013. – № 2. – С. 40–45.
- Тихонов И.Н. Армирование железобетонных конструкций зданий, проектируемых с учетом воздействия особых нагрузок: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2015. – 337 с.
- High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: Experimental investigation / L. Huynh, S. Foster, H. Valipour, R. Rendall // Construction and Building Materials. – 2015. – V. 78. – P. 153–171.
- 43. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust // Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects: IV International Young Researchers Conference. Tomsk, 2017. V. 143. 6 p.
- 44. Саид А.Р.А. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1995. – 207 с.
- Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. – М.: Стройиздат, 1964. – 151 с.
- 46. 3D Modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load / A. Kezmani, L. Placidi, B. Chiaia, O. Kumpyak, V. Maksimov // European Journal of Environmental and Civil Engineering. - 2016. - V. 21. - P. 1-38. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194330
- Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading // AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction. – Tomsk, 2016. – P. 59–68.
- Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load // Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering. – 2013. – V. 7. – № 2. – P. 10–15.
- 49. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes // The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering. - Hong Kong, 2011. - № 14. - P. 442-449.
- 50. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes / K.H. Lion, R.A.G. Amir, E. Prasetyo, Y. Khairi // WSEAS Transactions on Aapplied and Theoretical Mechanics. - 2009.- V. 4. -№ 3. - P. 95-104.
- 51. Lipa S., Kotełko M. Lateral impact of tubular structure theoretical and experimental analysis. P. 1 Investigation of single tube // Journal of theoretical and applied mechanics. 2013. V. 51. № 4. P. 873–882.
- 52. Somya P., Chawalit T., Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending // Proc. of World Academy of Science: Engineering & Technology. – Dec. 2007. – V. 36. – P. 329–334.

Поступила 28.02.2019 г.

## Информация об авторах

**Однокопылов Г.И.**, доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кумпяк О.Г., доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

*Галяутдинов З.Р.*, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

*Галяутдинов Д.Р.*, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкции Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 69.058.8

# DETERMINATION OF VITALITY PARAMETERS OF PROTECTED CRITICAL ENGINEERING STRUCTURES UNDER SHOCK-WAVE LOADING

Georgy I. Odnokopylov<sup>1</sup>,

OGIz@yandex.ru

Oleg G. Kumpyak<sup>2</sup>, OGKumpyak@yandex.ru

Zaur R. Galyautdinov<sup>2</sup>, GaZR@yandex.ru

## Daud R. Galyautdinov<sup>2</sup>,

DaudG@yandex.ru

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russia.

**The relevance** of work is related to the trend of emergencies at oil and gas industry enterprises. In this relation, it is necessary to design reinforced concrete structures, which can be affected by intensive short-term dynamic loads of emergency shock-wave type. Taking into account the reaction of expansion during design allows revealing the hidden reserves of load-bearing capacity in bent ferroconcrete structures, as well as reducing cracking, due to the increase in rigidity. The effective way to reduce the magnitude of the dynamic impact is the use of yielding supports in the form of collapsible inserts of the annular section. Thus, the joint application of yielding supports and consideration of the spacer reaction make it possible to prevent damage, complete or partial destruction of structures. In addition, damage to the building structures of critical buildings and structures of the oil and gas complex leads to a halt in technological process, which in some cases is not only economically unprofitable, but also unacceptable, and can lead to significant material damage and loss of life.

**The aim** of the work is to develop a methodology and algorithm for constructing energy diagram, perform a numerical assessment of using compliant supports for survivability of protected building structures under intensive loading

**Methods:** experimental studies: reaction of input force, reaction of output force, acceleration, displacement by tensometry methods, numerical integration by Simpson method.

**Results.** The authors have developed the technique and algorithm for constructing the averaged energy diagram and carried out the numerical assessment of using malleable supports for survivability of protected building structures of oil and gas facilities under short-term dynamic loading.

#### Key words:

Vitality, protected building construction, energy diagram, coefficient of resultant force, short-term dynamic loading, shock-wave loading, reinforced concrete, thrust, flexible supports, inertial forces, experimental studies.

#### REFERENCES

- Kotlyarevskiy V.A., Zabegaev A.V., Glazunov Yu.N., Petrov A.A. Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy [Accidents and disasters. Prevention and elimination of consequences]. Eds. V.A. Kotlyarevsky, A.V. Zabegayev. Moscow, ASV Publ., 1998. B. 4, 204 p.
- Birbrayer A.N., Roleder A.Yu. Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya [Extreme Impacts on Structures]. St-Peterburg, Polytechnic University Publ., 2009. 594 p.
- Tamrazyan A.G. Otsenka zhivuchesti zdaniy pri kombinirovannykh avariynykh vozdeystviyakh [Assessment of survivability of buildings under combined emergency effects]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2003, no. 10, pp. 39–41.
- 4. Tonkikh G.P. Po voprosu ispolzovaniya dinamicheskikh ispytaniy dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i seysmostoykosti zdaniy i sooruzheniy [Issue of using dynamic tests to assess the technical state and seismic stability of buildings and structures]. *Monitoring. Nauka i bezopasnost*, 2012, no. 4 (8), pp. 54–58.
- 5. Pakhmurin O.R. Prevention of uncontrolled progressive collapse of a high-rise brick building. *IV International Young Researchers Conference. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects.* Tomsk, 2017. Vol. 143, 6 p.

- Baldin I.V. Issledovanie zhelezobetonnykh korotkikh tsilindricheskikh obolochek pokrytiy pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii. Dis. Kand. nauk [Investigation of reinforced concrete short cylindrical shells of coatings under short-term dynamic loading. Cand. Diss.]. Tomsk, 1994. 334 p.
- Belov N.N., Yugov N.T., Kopanitsa D.G., Plevkov V.S., Yugov A.A., Shashkov V.V., Kudyakov K.L., Ustinov A.M. Model of dynamic destruction of fiber concrete. *Vestnik of Tomsk State Univer*sity of Architecture and Building, 2014, no. 5 (46), pp. 63–76. In Rus.
- Pedikov A.V. Issledovanie szhato-izgibayemykh zhelezobetonnykh balochnykh konstruktsiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii. Dis. Kand. nauk [Investigation of compressible-bending reinforced concrete girder structures on compliant supports under short-term dynamic loading. Cand. Diss.]. Tomsk, 2006. 174 p.
- Plevkov V.S., Kolupaeva S.N., Kudyakov K.L. Calculated diagrams of nonlinear deformation of basalt fiber concrete during static and short-term dynamic effects. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2016, no. 3 (56), pp. 95-110. In Rus.
- 10. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskiy A.V. Strength and deformability of composite polymer reinforcement

under static and short-term dynamic tension and compression. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2016, no. 5 (58), pp. 91–101. In Rus.

- Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. To evaluation of strength of reinforced concrete bending elements under torsion from shortterm dynamic loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2017, no. 2 (61), pp. 112–122. In Rus.
- Sargsyan A.E. Dinamika i seysmostoykost sooruzheniy atomnykh stantsiy [Dynamics and seismic resistance of nuclear facilities]. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2013. 550 p.
- SP 88.13330.2014. Zashchitnye sooruzheniya grazhdanskoy oborony [Civil defense defenses. Moscow, NIIZhB im. Gvozdeva A.A. Publ., 2014. 156 p.
- Ustinov A., Kopanitsa D., Abzaev Yu., Klopotov A., Koshko B., Kopanitsa G. Study of deformations evolution in near-surface layers of adhesive joints. 3<sup>rd</sup> International Young Researchers Conference on Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. Tomsk, 2018. Vol. 1800, 7 p. DOI: 10.1063/1.4973048
- Ustinov A., Kopanica D., Belov N., Yugov N., Ygov A., Koshko B., Kopanitsa G. Strength calculation for fiber concrete slabs under high velocity impact. 3<sup>rd</sup> International Young Researchers Conference on Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. Tomsk, 2018. Vol. 1800. - 6 p. DOI: 10.1063/1.4973049
- Kudyakov K.L., Plevkov V.S., Nevsky A.V. Strength and deformability of concrete beams reinforced by non-metallic fiber and composite rebar. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 71, pp. 2–7.
- Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V., Plevkov V.S., Kudyakov K.L. Experimental and numerical investigation of concrete structures with metal and non-metal reinforcement at impulse loadings. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 2016, vol. 774, pp. 2–8.
- Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Mechanical properties of composite rebar under static and short-term dynamic loading. *AIP Conference Proceedings*. Tomsk, 2017. Vol. 1800. pp. 2–6. DOI: 10.1063/1.4973059.
- Stekolnikov Yu.I. Zhivuchest sistem [Survivability of systems]. St-Petersburg, Politekhnika Publ., 2002. 155 p.
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive. *IOP Conference Series: Materials Science* and Engineering, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–6,. Article number 012015.
- Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive. *IOP Conference Series: Materials Science and En*gineering, 2014, vol. 66, no. 1, pp. 1–7, Article number 012035
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Mathematical model of brushless DC motor in phase loss operation mode. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 24-29.
- Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Algorithms of fault tolerant control of induction motor electric drive in phase loss operate mode. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings.* Omsk, May 21–23, 2015. Novosibirsk, IEEE Russia Siberia Section, 2015. pp. 1–5.
- 24. Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control of switched-reluctance drive in emergency modes. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON):* proceedings. Omsk, May 21–23, 2015. Novosibirsk, IEEE Russia Siberia Section, 2015. pp. 140–144.
- Odnokopylov G.I., Rozaev I.A. Fault-tolerant control algorithms of switched-reluctance motor drive in open-phase modes. The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST): proceedings. Novosibirsk, June 1–3, 2016. pp. 140–144.
- Vajda I., Glazyrin A., Ustinova I., Bolovin E. Influence of Design Methods a Discrete Model of Separately Excited DC Motor on Parameters Estimation. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 219–233.

- 27. Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus. DOI: 10.18799 /24131830/2019/1/70.
- Plevkov V.S., Radchenko A.V., Baldin I.V., Radchenko P.A., Goncharov M.E., Batuev S.P. Osobennosti razrusheniya zhelezobetonnykh konstruktsiy pri dinamicheskom nagruzhenii [Features of destruction of reinforced concrete structures under dynamic loading]. *Tambov University Review*, 2013, vol. 18, Iss. 4, pp. 1578-1579.
- Ozbolt J., Sharma A., Irhan B., Sola E. Tensile behavior of concrete under high loading rates. Int. J. of Impact Eng., 2014, vol. 69, no. 5, pp. 55-68.
- 30. Kim J.H., Kim D., Han Heung Nam Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels. *Materials Science & Engineering A*, 2013, no. 559, pp. 222–231.
- Shang S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40, no. 2, pp. 322–329.
- 32. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85-95. In Rus.
- Popov N.N., Rastorguev B.S. Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy [Issues of calculation and design of special structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
- Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.V. Raschet konstruktsiy na dinamicheskie spetsialnye nagruzki [Calculation of structures for dynamic special loads]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992. 319 p.
- Rastorguyev B.S. Obespechenie zhivuchesti zdaniy pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Ensuring the survivability of buildings with special dynamic effects]. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2003, no. 4, pp. 45–48.
- Rastorguev B.S. Primenenie dinamicheskikh gasiteley kolebaniy pri vzryvnykh vozdeystviyakh [Use of dynamic vibration dampers for explosive effects]. Stroitelnaya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2009, no. 1, pp. 50–57.
- 37. Vinogradova T.N. Vliyanie raspora na rabotu zhelezobetonnykh balochnykh konstruktsiy pri kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh. Dis. kand. nauk [Influence of thrust on operation of reinforced concrete girder structures of short-time dynamic effects. Cand. Diss.]. Moscow, 1977. 155p.
- 38. Zulpuev A.M. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh raspornykh plit perekrytiy v zdaniyakh s monolitnymi stenami. Monografiya [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete floor slabs in buildings with monolithic walls. Monography]. Bishkek, Ilim Publ., 2010. 80 p.
- 39. Zulpuev A.M., Baktygulov K. Raschet na prochnost sbornykh zhelezobetonnykh plit perekrytiy, opertykh po konturu [Strength analysis of precast reinforced concrete floor slabs supported along the contour]. *Territoriya nauki*, 2016, vol. 1, pp. 63–68.
- 40. Tikhonov I.N. Printsipy rascheta prochnosti i konstruirovaniya armirovaniya balok perekrytiy zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona dlya predotvrashcheniya progressiruyushchego razrusheniya [Principles of strength calculation and design of reinforcement of girders of buildings from monolithic reinforced concrete to prevent progressive destruction]. *Zhilishchnoye stroitelstvo*, 2013, no. 2, pp. 40–45.
- 41. Tikhonov I.N. Armirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy, proektiruyemykh s uchetom vozdeystviya osobykh nagruzok. Dis. Dokt. nauk [Reinforcement of reinforced concrete structures of buildings designed to withstand the effects of special loads. Dr. Diss.]. Moscow, 2015. 337 p.

- Huynh L., Foster S., Valipour H., Rendall R. High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 78, pp. 153-171.
- 43. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust. *IV International Young Researchers Conference. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects.* Tomsk, 2017. Vol. 143, 6 p.
- 44. Said A.R.A. Povyshenie nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy pri vzryvnykh vozdeystviyakh. Dis. Kand. nauk [Increasing the bearing capacity of reinforced concrete structures with explosive effects. Cand. Diss.]. Moscow, 1995. 207 p.
- Popov N.N., Rastorguyev B.S. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy na deystvie kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok [Calculation of reinforced concrete structures for short-term dynamic loads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 151 p.
- Kezmani A., Placidi L., Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V. 3D Modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, vol. 21, pp. 1–38. DOI: 10.1080/ 19648189.2016.1194330
- Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction*. Tomsk, 2016. pp. 59–68.

- Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load. Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 10–15.
- 49. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering. Hong Kong, 2011. No. 14, pp. 442–449.
- Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes. WSEAS transactions on applied and theoretical mechanics, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 95-104.
- Lipa S., Kotełko M. Lateral impact of tubular structure theoretical and experimental analysis. P. 1 – Investigation of single tube. *Journal of theoretical and applied machanics*, 2013, vol. 51, no. 4, pp. 873–882.
- Somya P., Chawalit T., Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending. Proc. of World Academy of Science: Engineering & Technology, Dec. 2007, vol. 36, pp. 329-334.

Received: 28 February 2019.

#### Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg G. Kumpyak, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Zaur R. Galyautdinov, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Daud R. Galyautdinov, postgraduate student, Tomsk State University of Architecture and Building.

УДК 621.577.001.5

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ РАБОТЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СИСТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

## Максимов Вячеслав Иванович<sup>1</sup>,

elf@tpu.ru

# Салум Амер<sup>1</sup>,

amer@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Использование теплонасосных установок для отопления вместо традиционных систем,

которые получают энергию в процессе сжигания различных видов топлива, имеет ряд экологических и экономических преимуществ. Тепловые насосы могут получать энергию из воздуха, грунта и воды. Их сферы применения разнообразны: горячее водоснабжение и кондиционирование помещений, нагрев и охлаждение воды для различных нужд, сушки/осушения воздуха, производства пара, испарения, дистилляции. При применении природных водоёмов (озёра, пруды, водохранилища) в качестве низкопотенциального источника энергии теплонасосных установок на поверхности трубки испарителя образуется лёд. Важно рассматривать закономерности и характеристики процессов теплообмена между водой и трубкой испарителя при образовании льда на её поверхности.

**Цель:** математическое моделирование нестационарного конвективного теплообмена между водой и трубками испарителя теплонасосных установок в условиях формирования льда на их поверхности.

Объект: теплообменник испарителя теплового насоса, погружённый в воду.

**Методы:** численное решение задач конвективного теплообмена в условиях фазового перехода воды методом конечных элементов в среде COMSOL.

**Результаты**. Установлены закономерности нестационарного конвективного теплопереноса вблизи трубок испарителя водяного теплового насоса с температурой, при которой образуется лёд на их поверхности. Показана необходимость учета влияния термогравитационной конвекции в воде на тепловой поток и процесс образования льда на поверхности трубки испарителя теплонасосной установки. Получены зависимости числа Нуссельта от характеристики конвективного теплообмена в воде (чисел Рэлея, Фурье и Стефана). Выявлено, что перепад температур в воде вблизи трубки увеличивался при уменьшении глубины её расположения относительно поверхности водного источника при показателях температур воды выше 277 К. При температурах воды ниже 277 К тепловой поток достигал максимального значения у поверхности трубки, которая находилась глубже.

#### Ключевые слова:

Термогравитационная конвекция, образование льда, водяной тепловой насос, фазовый переход, низкопотенциальный источник энергии.

### Введение

Использование геотермальных ресурсов в последнее время представляет собой одну из актуальных задач [1-3], но для ее успешного решения необходимо применять новые технологии [4-6]. Особенно перспективным, по мнению многих специалистов [7–9], становится применение в локальных системах теплоснабжения теплонасосных установок (ТНУ) с целью использования геотермальных водных ресурсов - источников теплоты. Применение ТНУ для теплоснабжения как самостоятельной технологии или комбинированной с различными источниками энергии [10] увеличивает экономичность и экологичность системы отопления [11], технология выработки теплоты с использованием установки имеет ряд особенностей, которые осложняют применение ТНУ в холодные времена года [12]. Компрессорные тепловые насосы обладают высоким коэффициентом преобразования энергии, так как при получении тепла из низкопотенциального источника за счёт испарения фреона происходит увеличение его давления и температуры в компрессоре, после чего нагрев теплоносителя в процессе перехода хладагента из газообразного состояния в жидкое в конденсаторе.

Но высокая эффективность этого процесса возможна только в относительно узком интервале температур источника низкопотенциального тепла. При уменьшении этой температуры интенсивность испарения фреона замедляется, в результате чего значительно снижается эффективность работы *THY* [13, 14].

Недостатком применения непроточных водоёмов в качестве источника энергии ТНУ является их низкая температура в холодное время года и, соответственно, обмерзание трубок испарителя, что приводит к существенному снижению характеристик работы теплового насоса в целом. Для повышения энергоэффективности таких систем использования геотермальной энергии, эксплуатируемых при низких температурах, необходима оценка интенсивности процессов обмерзания трубок теплообменника – испарителя ТНУ в условиях пониженной температуры омывающего их низкопотенциального источника тепла – холодной воды. Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в слое воды вокруг трубок испарителя ТНУ затруднено по целому ряду причин (замкнутое пространство, малые характерные размеры, образование льда и др.). Основным методом анализа характеристик процессов теплопереноса в малой окрестности трубок испарителя (температур, тепловых потоков, толщин слоя льда) является математическое моделирование.

Целью работы является математическое моделирование процессов теплопереноса в воде, окружающей трубки испарителя *THУ*, и образования льда на их поверхности.

#### Постановка задачи и метод решения

Экспериментальные исследования [15] показали, что перенос теплоты в пространстве между трубками испарителя работающего теплового насоса и водой осуществляется за счет теплопроводности и термогравитационной конвекции. Поэтому при постановке задачи теплопереноса вокруг трубок испарителя необходимо учитывать эти два механизма переноса теплоты. Рассматривалась двумерная прямоугольная область с водой, в которой располагались три трубки испарителя *THУ* (рис. 1). В общем случае их может быть и больше, но для обоснования выводов об основных закономерностях исследуемых процессов конвекции и кондукции достаточно трех.



Рис. 1. Область решения задачи: 1 – вода; 2 – трубки испарителя ТНУ; 3 – условные границы области решения, выделенные в водоеме с непроточной водой

Fig. 1. Studied area: 1 is the water; 2 are the evaporator heat pump pipes; 3 are the studied area boundary conditions, which represent a reservoir with non-moving water

Решение задачи теплопереноса в области, представляющей собой типичный фрагмент рабочей зоны испарителя теплового насоса, проведено в рамках модели, разработанной авторами [16]. Решалась система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений (1)-(4) (уравнения сохранения массы, импульса и энергии) аналогичная приведенной в [16, 17]:

$$\nabla U = 0, \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + U\nabla U\right) - (\mu \nabla (\nabla U + (\nabla U)^{T}) - \rho(T)g = 0, (2)$$

$$\rho C_{P} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho C_{P} U \nabla T - \nabla \lambda \nabla T = 0, \qquad (3)$$

$$\rho = \rho_i (1 - \alpha(T)) + \rho_w \alpha(T), \qquad (4)$$

где T – температура, K; U – скорость, м/с;  $\tau$  – время, с;  $\mu$  – динамическая вязкость, H·c/м<sup>2</sup>;  $\rho_i$ ,  $\rho_w$  – плотность льда и воды, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{P,i}$ ,  $C_{P,w}$  – удельная теплоемкость льда и воды, соответственно, Дж/кг-K; g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha(T)$  – фазовый индикатор (для твердого вещества  $\alpha(T)$ =0, для жидкости  $\alpha(T)$ =1).

С целью учета влияния фазового перехода на теплоёмкость среды использовалось выражение (5), (6) [18]:

$$C_{p} = C_{p,i}(1 - \alpha(T)) + C_{p,w}\alpha(T) + L_{i \to w} \frac{\partial \alpha_{m}}{\partial T}, \qquad (5)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\rho_i(1 - \alpha(T)) - \rho_w \alpha(T)}{\rho_i(1 - \alpha(T)) + \rho_w \alpha(T)}.$$
 (6)

Теплопроводность вычислялась с учетом возможного изменения объёмных долей компонентов (7):

$$\lambda = \lambda_i (1 - \alpha(T)) + \lambda_w \alpha(T), \tag{7}$$

где  $\lambda_i$ ,  $\lambda_w$  – теплопроводность льда и воды, соответственно, (Вт/м·К);  $L_{i \to w}$  – скрытая теплота плавле-

ния льда, кДж/кг; 
$$rac{\partial lpha_m}{\partial T}$$
 – импульс Дирака, кото-

рый является производной от функции Хевисайда. Функция Хевисайда равна нулю в случае отрицательных показателей аргумента и – одному при положительных (эти функции указывают на переход из одного фазового состояния в другое при температуре фазового перехода 273 К).

При проведении численного моделирования предполагалось, что теплофизические свойства воды (за исключением плотности) не зависят от температуры, а режим течения принят ламинарным.

Начальные условия для системы уравнений (8)-(10):

$$u=0 \text{ m/c}, v=0 \text{ m/c}, T_w=280 \text{ K},$$
 (8)

u, v – компоненты скорости на оси Ox, Oy, соответственно;  $T_w$  – средняя температура воды, К.

Граничные условия (9), (10):

На внешних границах области решения:

$$u=0 \text{ M/c}, v=0 \text{ M/c}, \frac{\partial O}{\partial x} = \frac{\partial O}{\partial y} = 0.$$
 (9)

На поверхностях трубок испарителя (10):

$$u=0 \text{ M/c}, v=0 \text{ M/c}, T_p=263 \text{ K},$$
 (10)

 $T_p$  — температура поверхности трубки испарителя со стороны воды, К.

Численные исследования выполнялись при следующих значениях основных параметров: • Теплофизические:

 $λ_w = 0.56$  BT/M·K;  $λ_i = 2.25$  BT/M·K;  $C_{P,w} = 4.2$  Дж/κгK;  $C_{P,i} = 2.22$  Дж/кгK;

$$h1=h4=10$$
 MM;  $h2=h3=40$  MM;  $h=100$  MM;  
 $l=100$  MM;  $l1=l2=50$  MM;  $d=9,54$  MM.

Система уравнений с соответствующими краевыми условиями (1-10) решена в среде COMSOL [18] методом конечных элементов. Использовался ряд модулей: однофазного ламинарного потока «Laminar flow.spf» и теплопередачи в жидкости «Heat transfer in liquid.htf». При проведении вычислений внутри каждого модуля работали несколько фундаментальных компонентов: гравитация в модуле «Laminar flow.spf» и изменение фазового состояния в модуле «Heat transfer in liquid.htf». В модуле (Laminar flow.spf) вязкость варьировалась от её значения для воды при температуре 293 К до «бесконечно большого» в зависимости от температуры. При моделировании по аналогии с [16] рассматривались две среды: жидкость (вода) и твердое тело (лёд). Учитывалось, что вязкость льда существенно больше её значения для жидкости. В начальный момент времени температура во всех точках области решения составляла  $T_{w}$ =280 К. При этом вода считалась неподвижной. Во время моделирования температура поверхности трубки испарителя имела постоянное значение и составляла 263 К (температура кипения хладагента). На сторонах квадрата приняты условия «неразрывности»

 $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ , соответствующие границам, до кото-

рых не доходит «тепловая волна» [18].

Применялась неравномерная (сгущающаяся) разностная сетка. Для повышения точности вычислений использовался неравномерный шаг по времени  $\Delta \tau$  (от 0,5 до 0,1 с). Характерное время моделирования составляло 5000 с. Выбран параллельный итерационный прямой решатель (*PARDISO*). В результате численных исследований определены основные характеристики процесса: поля скоростей и температур (рис. 2–5).



Рис. 2. Поля температур в разные моменты времени при размещении трех трубок испарителя в области решения: а) т=100 с; б) т=300 с; в) т=500 с; е) т=1000 с

Fig. 2. Temperature field in different moments in the case when three pipes are located in the studied area: a)  $\tau$ =100 sec; b)  $\tau$ =300 sec; c)  $\tau$ =500 sec; d)  $\tau$ =1000 sec

#### Результаты численного моделирования

Представлены распределения температур в зоне испарителя (рис. 2) с тремя трубками, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 1)

Анализ результатов вычислений показывает (рис. 2), что в первые 200 с работы *THУ* максимальная температура воды 280 К сохранялась в верхней части области решения вблизи верхней трубки. Охлажденные слои воды перемещались вниз. При снижении температуры воды до 277 К (соответствует моменту времени 300 с) в результате работы испарителя направление температурной стратификации изменялось на противоположное: холодная вода поднималась вверх, а слои воды с температурой 277 К перемещались вниз. С ростом времени вода продолжала охлаждаться за счет теплообмена с холодными фреоновыми трубками. При т=1000 с температура воды снижалась до 273 К, и конвективное движение прекращалось. В первые 100 с работы *ТНУ* на нижней части верхней трубки формировался слой льда большей толщины, чем на верхней (рис. 3). Это объясняется тем, что со стороны нижней части верхней трубки температура воды первые 100 с была ниже, чем в области верхней части (рис. 2). На стенке нижней трубки наблюдалась противоположная картина: толщина образовавшегося льда была выше на её верхней части. По истечении 600 с толщина слоя образовавшегося льда продолжала равномерно увеличиваться на теплообменных поверхностях всех трубок (рис. 3).



**Puc. 3.** Изменение толщины льда на поверхностях трубок испарителя со временем: a) τ=100 c; б) τ=700 c; в) τ=1500 c; ε) τ=5000 c **Fig. 3.** Ice thickness changes on the evaporator pipes surfaces with time: a) τ=100 sec; b) τ=700 sec; c) τ=1500 sec; d) τ=5000 sec



Рис. 4. Линии постоянных скоростей течения воды вблизи поверхности трубок испарителя в разные моменты времени: а) τ=100 с; б) τ=300 с; в) τ=500 с; г) τ=1000 с



Заметны изменения численных значений и направлений скорости движения охлаждаемой воды при изменении её температуры и, соответственно, плотности (рис. 4). Наиболее интенсивное движение под влиянием подъёмной силы имеет место в области расположения трубок испарителя. При увеличении расстояния от их поверхности по координатным направлениям x и y конвективное перемещение воды становилось более медленным. Средняя скорость термогравитационного течения воды в области трубок испарителя составляла 0,001 м/с при температурах 277–280 К.

Градиенты температур приводят к образованию двух крупных вихрей в рассматриваемой области решения (рис. 5). По истечении 1000 с температура воды выравнивается по всему объему и становится равной 273 К, конвективное перемещение воды, по существу, прекращается.

Показано изменение средней толщины слоя льда, образующегося на поверхностях трубок испарителя, со временем (рис. 6). Заметно, что в первые 300 с работы *THУ* скорость образования льда на поверхностях всех трех трубок практически одинакова. С ростом времени толщина слоя льда увеличивается быстрее на трубках, расположенных ближе к верхней границе области, т. к. после 300 с работы в верхней части области решения сосредотачиваются слои воды с более низкой температурой (рис. 2). Это способствует более быстрому обледенению верхней трубки.

Показаны изменения теплового потока между трубками с хладоном и водой вблизи поверхностей трубок (рис. 7). В интервале времени до 300 с тепловой поток от воды к верхней трубке незначительно больше, чем к нижней трубке.

Это объясняется тем, что в первые 300 с работы THY тёплые слои воды располагаются ближе к верхней трубке. В интервале времени  $300 \le \tau \le 1000$  с изменяется направление температурной стратификации, и слои с более низкой температурой поднимаются вверх, тепловой поток между водой и нижней трубкой становится боль-





**Рис. 5.** Линии тока воды в разные моменты времени: а) τ=100 с; б) τ=300 с; в) τ=500 с; г) τ=1000 с

Fig. 5. Water current lines in different moments from modeling time: a)  $\tau$ =100 sec; b)  $\tau$ =300 sec; c)  $\tau$ =500 sec; d)  $\tau$ =1000 sec

 $\delta \cdot 10^3$ , M



Puc. 6. Изменения толщины льда на поверхности трубок испарителя со временем: 1 – нижняя; 2 – центральная; 3 – верхняя
Fig. 6. Dependence of ice thickness formed on the evaporator pipe surface with time: 1 – for lower pipe; 2 – for central pipe; 3 – for higher pipe

ше. Спустя 1000 с температура воды во всем объеме снижается до 273 К, что соответствует условиям кристаллизации воды на стенке трубки испарителя (рис. 7).

## Заключение

Решение задачи нестационарного теплопереноса в воде, окружающей трубки испарителя *THУ*, и образования льда на их поверхности даёт возмож-



Рис. 7. Изменения во времени теплового потока между водой и трубками испарителя: 1 – нижняя; 2 – центральная; 3 – верхняя

Fig. 7. Heat flux between the water and the evaporator pipe: 1 - for lower pipe; 2 - for central pipe; 3 - for higher pipe

ность оценить интенсивность процессов обмерзания трубок теплообменника – испарителя THY – в условиях пониженной температуры омывающего их низкопотенциального источника тепла – холодной воды.

Полученные в результате математического моделирования данные позволяют оценить энергоэффективность систем *THУ*, эксплуатируемых при низких температурах воды, и дать рекомендации

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Todoran T.P., Balan M. C. Long term behavior of a geothermal heat pump with oversized horizontal collector // Energy and Buildings. - 2016. - V. 133. - P. 799-809. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816312889 (дата обращения: 15.02.2019).
- Evaporation heat transfer and pressure drop for geothermal heat pumps working with refrigerants R134a and R407C / Kh.R. Dione, H. Louahlia, M. Mariona, J.L. Berçaits // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 93. – P. 1–10. URL: https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S0735193318300162 (дата обращения: 15.02.2019).
- Харченко В.В., Сычев А.О. Оптимизация низкотемпературного контура теплонасосной установки на основе теплоты поверхностных вод // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 7 (129). – С. 31–36. URL: https://elibrary.ru/item.asp? id=19403468 (дата обращения: 15.02.2019).
- Гершкович В.Ф. От централизованного теплоснабжения к тепловым насосам // Энергосбережение. 2010. № 3. С. 24–28. URL: https://www.abok.ru/for\_spec/articles.php? nid=4558 (дата обращения: 15.02.2019).
- Zhou C., Ni L., Yao Y. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump // Energy. 2018. V. 163. P. 1032–1049. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218317262 (дата обращения: 15.02.2019).
- Analysis on Several Heat Pump Applications in Large Public Buildings / L. Shengchun, Z. Wenkai, D. Ziteng, S. Gang // Journal of Building Construction and Planning Research Technology. 2015. № 3. P.136–148. URL: https://file.scirp.org/pdf/JBCPR\_2015092215345661.pdf (дата обращения: 15.02.2019).
- Сычев А.О., Харченко В.В. Пути повышения технико-экономических показателей теплонасосных установок, использующих теплоту поверхностных вод // Альтернативная энергети-

по повышению эффективности их работы в условиях осеннего, зимнего и весеннего периодов года.

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

ка и экология. - 2015. - № 10-11. - С. 84-90. URL: https:// www.isjaee.com/jour/article/view/123?locale=ru\_RU (дата обращения: 15.02.2019).

- Maksimov V.I., Saloum A. Convection influence on ice formation process on the evaporator heat pump pipes // Smart Grids 2017: The Fifth International Youth Forum: MATEC Web of Conferences. – Tomsk, Russia, 22–23 April, 2017. – V. 141. – 5 p. URL: https:// www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/ 2017/55/matecconf\_smartgrids2017\_01001.pdf (дата обращения: 15.02.2019).
- Maksimov V.I., Nagornova T.A., Chernyshev V.S. Conditions and characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures // Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy: MATEC Web of Conferences. – Tomsk, Russia, 22–23 April, 2015. – V. 23. – 8 p. URL: https:// www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2015/04/ matecconf tsotr2015 01051.pdf (дата обращения: 15.02.2019).
- A study on the evaluation of the annual energy consumption for a geothermal heat pump system with open loop and closed loop ground heat exchangers / S. Baohen, K.H. Lee, S. Cho, J.M. Choi // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. – 2017. – V. 25. – № (3). – 35 p. URL: https://www.worldscientific.com/doi/ 10.1142/S2010132517500249 (дата обращения: 15.02.2019).
- Liu Z., Tan H., Li Z. Heating and Cooling Performances of River-Water Source Heat Pump System for Energy Station in Shanghai // Procedia Energy. - 2017. - V. 205. - P. 4074-4081. URL: https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/read/noindex/pii/S1877705817344569/1-s2.0-S1877705817344569main.pdf (дата обращения: 15.02.2019).
- Amoabeng K.O., Lee K.H. A study on the performance characteristics of a testing facility for a water to water heat pump // International Journal of Refrigeration. – 2018. – V. 86. – P. 113–126. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304565 (дата обращения: 15.02.2019).

- Zou S., Xie X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump // Applied thermal energy. – 2017. – V. 112. – P. 201–207. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X (дата обращения: 15.02.2019).
- 14. Schibuola L., Scarpa M. Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump // Energy and Buildings. 2015. V. 113. P. 182–188. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304849 (дата обращения: 15.02.2019).
- Hansen G.M. Experimental Testing and Analysis of Spiral-Helical Surface Water Heat Exchanger Configurations: a thesis of the degree Bachelor of Science in Mechanical Engineering. – Oklahoma, 2011. – 171 p. URL: https://hvac.okstate.edu/sites/default/files/pubs/theses/MS/Garrett% 20Michael% 20Hansen% 20Masters% 20Thesis% 202011.pdf (дата обращения: 15.02.2019)
- Bourisli R., Alshayji A. Natural convection effects on the solidification in cylinders at different filling percentages // The

2017 COMSOL Conference in Rotterdam. – Rotterdam, Niederlande, 18–20 September, 2017. – 5 p. URL: https://www.comsol.com/paper/download/442131/bourisli\_abstract.pdf (дата обращения: 15.02.2019).

- 17. Analysis of the icing and melting process in a coil heat exchanger/ Y. Li, C.Yang, Z.Yan, B.Guo, H.Yuan, J. Zhao, N. Mei // Energy Procedia. – 2017. – V. 136. – P. 450–455. URL: https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/read/noindex/pii/S1876610217352529/1-s2.0-S1876610217352529main.pdf (дата обращения: 15.02.2019).
- Morton A.C. Assessing the performance of a reservoir-based water source heat pump: a thesis of the degree Master of Science. Glasgow, Scotland, 2013. – 89 p. URL: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\_2013/Morton.pdf (дата обращения: 15.02.2019).

Поступила 26.02.2019 г.

## Информация об авторах

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

*Салум А.*, аспирант научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

#### UDC 621.577.001.5

## MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TRANSFER BY OPERATION OF GEOTHERMAL HEAT PUMPS

## Vyacheslav I. Maksimov<sup>1</sup>, elf@tpu.ru

## Amer Saloum<sup>1</sup>,

amer@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The use of heat pumps to provide heat instead of traditional systems, which get energy from the burning of different fossil fuel kinds, has a number of environmental and economic benefits. Heat pumps can use air, ground, and water as an energy source. They can be used for various applications: hot water supply, air conditioning, heating and cooling water for different uses, air drying/dehumidification, vapor production, evaporation, and distillation. By the use of natural water surface (lakes, ponds, reservoirs) as a low-potential heat source for heat pump, ice can be formed on the evaporator pipe surface. It is important to study the heat exchange characteristics between the water and the evaporator pipe undergoing ice formation on its surface.

The main aim of the research is mathematical modeling for non-stationary convective heat exchange between the water and the heat pump evaporator pipes under the conditions of ice formation on their surface.

The object of the research is the heat pump evaporator heat exchanger which is surrounded by water.

The methods of the research are numerical solutions for convective heat transfer problem under the conditions of the water phase change by the use of the finite element method in COMSOL environment.

Results. The authors have established the unsteady convective heat transfer laws near the water source heat pump evaporator pipes with the temperature under water freezing point. In calculations of the heat flux and ice thickness growth rate on the surface of heat pump evaporator pipe, the natural convection in water effect must not be ignored. The authors obtained the dependence of Nusselt number on the natural convection heat exchange characteristics undergoing a phase change (Rayleigh, Fourier and Stefan numbers). It is revealed that the drop rate in water temperature around the pipe increases with the decrease of its depth from the surface of the water source for water temperatures values higher than 277 K. For water temperatures lower than 277 K, the heat flux is maximum around the pipe, which is located deeper.

#### Kev words:

Natural convection, ice formation, water source heat pump, phase change, low-potential heat source.

The research was carried out within the Program of National Research Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement among the leading world Research and Educational centers (State Science «8.13264.2018 / 8.9, project VIU-ISHE-300/2018).

#### REFERENCES

- 1. Todoran T.P., Balan M. C. Long term behavior of a geothermal heat pump with oversized horizontal collector. Energy and Buildings, 2016, vol. 133, pp. 799-809. Available at: https://www. sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816312889 (accessed 15 February 2019).
- 2. Kh.R. Dione, H. Louahlia, M. Mariona, J.L. Berçaits. Evaporation heat transfer and pressure drop for geothermal heat pumps working with refrigerants R134a and R407C. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, vol. 93, pp. 1-10. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193318300162 (accessed 15 February 2019).
- 3. Kharchenko V.V., Sychev A.O. Optimization of low temperature circuit of surface water heat pump based system. Alternative Energy and Ecology, 2013, no. 7 (129), pp. 31-36. In Rus. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=19403468 (accessed 15 February 2019).
- Kershkovich V.F. Ot tsentralizovannogo teplosnabzheniya k teplovym nasosam [From district heating to heat pumps]. Energosberezhenie, 2010, no. 3, pp. 24-28. Available at: https:// www.abok.ru/for\_spec/articles.php? nid=4558 (accessed 15 February 2019).
- Zhou C., Ni L., Yao Y. Heat transfer analysis of multi-row helically coiled tube heat exchangers for surface water-source heat pump. Energy, 2018, vol. 163, pp. 1032-1049. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/ S0360544218317262 (accessed 15 February 2019).

- 6. Shengchun L., Wenkai Z., Ziteng D., Gang S. Analysis on Several Heat Pump Applications in Large Public Buildings. Journal of Building Construction and Planning Research Technology, 2015, no. 3, pp. 136 -148. Available at: https://file.scirp.org/ pdf/ JBCPR\_2015092215345661.pdf (accessed 15 February 2019).
- 7. Sychev A.O., Kharchenko V.V. Ways to improve technical and economic indicators of a surface water heat pump based systems. Alternative Energy and Ecology, 2015, no. 10-11, pp. 84-90. In Rus. Available at: https://www.isjaee.com/jour/article/view/123?locale=ru RU (accessed 15 February 2019).
- 8 Maksimov V.I., Saloum A. Convection influence on ice formation process on the evaporator heat pump pipes. The Fifth International Youth Forum. Smart Grids 2017: MATEC Web of Conferences. Tomsk, Russia, 22-23 April, 2017. Vol. 141, 5 p. available at: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/  $pdf/2017/55/matecconf\_smartgrids2017\_01001.pdf~(accessed$ 15 February 2019).
- Maksimov V.I., Nagornova T.A., Chernyshev V.S. Conditions and 9. characteristics of water crystallization on the working surface of evaporator heat pumps in reservoirs with low temperatures. Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy: MATEC Web of Conferences. Tomsk, Russia, 22-23 April, 2015. Vol. 23, 8 p. Available at: https:// www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2015/04/ matecconf tsotr2015 01051.pdf (accessed 15 February 2019).
- 10. Baohen S., Lee K.H., Cho S., Choi J.M. A study on the evaluation of the annual energy consumption for a geothermal heat pump sy-

stem with open loop and closed loop ground heat exchangers. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2017, vol. 25, no. (3), 35 p. Available at: https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S2010132517500249 (accessed 15 February 2019).

- Liu Z., Tan H., Li Z. Heating and Cooling Performances of River-Water Source Heat Pump System for Energy Station in Shanghai. *Procedia Energy*, 2017, vol. 205, pp. 4074–4081. Available at: https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/read/noindex/pii/S1877705817344569/1-s2.0-S1877705817344569main.pdf (accessed 15 February 2019).
- Amoabeng K.O., Lee K.H. A study on the performance characteristics of a testing facility for a water to water heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 2018, vol. 86, pp. 113-126. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304565 (accessed 15 February 2019).
- Zou S., Xie X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump. *Applied thermal energy*, 2017, vol. 112, pp. 201–207. Available at: https://www. sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111632378X (accessed 15 February 2019).
- Schibuola L., Scarpa M. Experimental analysis of the performances of a surface water source heat pump. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 113, pp. 182–188. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304849 (accessed 15 February 2019).

- Hansen G. M. Experimental Testing and Analysis of Spiral-Helical Surface Water Heat Exchanger Configurations. A thesis of the degree Bachelor of Science in Mechanical Engineering. Oklahoma, 2011. 171 p. Available at: https://hvac.okstate.edu/sites/ default/files/pubs/theses/MS/Garrett% 20Michael% 20Hansen% 20Masters% 20Thesis% 202011.pdf (accessed 15 February 2019).
- Bourisli R., Alshayji A. Natural convection effects on the solidification in cylinders at different filling percentages. *The* 2017 COMSOL Conference in Rotterdam. Rotterdam, Niederlande, 18–20 September, 2017. 5 p. Available at: https://www.comsol.com/paper/download/442131/bourisli\_abstract.pdf (accessed 15 February 2019).
- Li Y., Yang C., Yan Z., Guo B., Yuan H., Zhao J., Mei N. Analysis of the icing and melting process in a coil heat exchanger. *Energy Procedia*, 2017, vol. 136, pp. 450–455. Available at: https://www.sciencedirect.com/sdfe/pdf/download/read/noindex/pii/S1876610217352529/1-s2.0-S1876610217352529-main.pdf (accessed 15 February 2019).
- Morton A.C. Assessing the performance of a reservoir-based water source heat pump. a thesis of the degree Master of Science. Glasgow, Scotland, 2013. 89 p. Available at: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\_2013/Morton.pdf (accessed 15 February 2019).

Received: 26 February 2019.

## Information about the authors

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

Amer Saloum, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556.331:551.312:546.79(571.16)

# ГЕОХИМИЯ УРАНА И ТОРИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ И ОЗЕР НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

## Иванов Андрей Юрьевич<sup>1</sup>,

lvanov-13@mail.ru

## Арбузов Сергей Иванович<sup>1</sup>,

Siarbuzov@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Радиоактивные элементы являются эффективными маркерами состояния донных отложений малых водоемов и озер. Актуальность проблемы определяется слабой изученностью радиоактивных элементов в донных осадках озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области.

**Цель:** изучение радиогеохимических особенностей донных осадков озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области.

Объектом исследования являются донные отложения малых водоемов и озер юга Томской области.

**Методы:** детальное опробование донных отложений малых водоемов, многоэлементный инструментальный нейтронно-активационный анализ, обработка и интерпретация полученных данных методами прикладной статистики.

**Результаты.** Проведены радиогеохимические исследования донных осадков озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области. Сделаны оценки среднего содержания урана и тория в донных осадках озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области. В процессе исследований установлено, что содержание как урана, так и тория зависит от минерального типа донных осадков. Наименьшие концентрации урана были установлены в торфянистом типе, а наиболее высокие концентрации – в терригенном типе донных осадков. Установлено две зоны с повышенным содержанием урана. Первая зона пространственно приурочена к Кожевниковскому и Шегарскому районам Томской области. В этом районе выделяется Осиновско-Бабарыкинская радиогеохимическии аномальная зона повышенного накопления урана, которая очень четко прослеживается в субмеридиональном направлении. В пределах Кожевниковского района она может быть связана с разгрузкой подземных вод в зоне Колыванского разлома. В Шегарском районе повышенные содержания урана пространственно приурочены к гранитоидам позднепалеозойского фундамента. Вторая зона накопления урана простирается вдоль южного обрамления Западно-Сибирской плиты в пределах Кузнецко-Алатаусского блока.

#### Ключевые слова:

Донные отложения, уран и торий, радиогеохимические исследования, зона аномального накопления урана, вертикальное распределение.

## Введение

Современная радиационная обстановка территории может складываться из природных и техногенных факторов. К природным факторам относится наличие радиогеохимически специализированных пород на территории, например, рудопроявлений и месторождений урана (Трубачевское, Пригородное, Малиновское и т. д.), которые расположены в южном обрамлении Западно-Сибирской плиты [1]. К техногенным факторам относится поступление радиоактивных элементов в окружающую среду, связанное с производственной деятельностью, например со сжиганием углей на ТЭС. Подтверждение тому – результаты многолетних исследований на территории Томского района и г. Томска. Нельзя исключать и влияние предприятий атомной промышленности как потенциального источника поступления радиоактивных элементов в окружающую среду [2, 3]. Хотя в последнем случае такие поступления успешно распознаются по специфике изотопного состава радионуклидов.

Донные отложения малых водоемов традиционно используются в качестве маркера для выявления состава, масштаба и интенсивности техногенного загрязнения, а также природного фактора для оценки геохимической специализации территории [4–11]. Преимущественно это обуславливается тем, что донные осадки малых водоемов отражают геохимические особенности сопряженных территорий, так как являются конечным звеном местных ландшафтных сопряжений.

Специализированные геохимические исследования донных отложений относятся к числу наиболее актуальных современных методов изучения экосистем. При детальном изучении колонки донных осадков это позволяет проследить эволюционные изменения состава окружающей среды, при этом выделить временные интервалы, в какой момент происходило наиболее интенсивное поступление в среду обитания человека радиоактивных элементов, получить информацию о радиационном фоне и возможных природных или техногенных аномалиях [12, 13].

Как правило, малые водоемы образуются по одному и тому же природному пути: изначально формируется чаша, в которой затем происходит осадконакопление. Именно поэтому схема образования донных осадков является практически идентичной для всех водоемов. По современным данным, для изучения процесса осадконакопления в малых водоемах следует проследить путь осадкообразования от мест формирования исходного материала осадка до осаждения его в исследуемом водоеме [14].

Скорость накопления донных отложений в различных водоемах неодинакова, но известно, что в среднем их мощность за последние столетия составляет несколько десятков сантиметров [12]. Детальное секционное опробование разреза донных отложений относительно небольшой мощности позволяет изучить природу их накопления за достаточно протяженный период времени, изучить закономерности распределения и проследить динамику поступления радиоактивных элементов в донные отложения [15]. Для решения этих задач авторами было выполнено детальное опробование и изучены основные закономерности пространственно-временного распределения урана и тория в донных осадках озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области.

Цель работы: изучение радиогеохимических особенностей донных осадков озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области для выявления их радиогеохимической специализации.

#### Характеристика объектов исследования

Исследованные водоемы находятся на юге и юго-востоке Томской области. Рассматриваемая территория расположена в пределах южнотаежной подзоны на границе с лесостепной зоной и характеризуется существенной дифференциацией гидрологических условий: в правобережной части водосбора реки Обь – модули водного стока составляют в целом более 4  $n/(c \cdot Km^2)$ , а в левобережной – менее 4  $n/(c \cdot Km^2)$ [16]. Водоемы района исследования в целом гидрологически изучены слабо. Наиболее полные сведения об объемах и химическом составе воды в озерах и водохранилищах приведены О.Г. Савичевым [16]. Озерные котловины в основном относятся к типу водно-эрозионных и водно-аккумулятивных, в случае болот – ко вторичным, возникшим в результате формирования вторичной гидрографической сети на болотах. Искусственные водоемы – чаще всего речные долиные или в долинах временных водотоков. Средний полный объем водохранилищ – 109 тыс. м<sup>3</sup>, средняя площадь акватории – 0,061 км<sup>2</sup>. Озерные воды (и воды водохранилищ) в целом характеризуются как пресные со средней минерализацией, по величине pH – от кислых до слабощелочных, обычно содержат значительное количество органического вещества, продуктов его разложения и железа [16].

Для опробования были выбраны естественные слабопроточные водоемы и искусственные водохранилища (пруды), возраст которых составлял не менее 20 лет. Средняя их глубина обычно не превышает 3 м. Донные осадки озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области имеют различный состав и представлены в основном илистыми глинисто-кластогенными осадками, реже органогенными торфянистыми отложениями и карбонатными сапропелями. В целом преобладают терригенные илистые отложения.

Всего опробовано 299 озер и искусственных водоемов (рис. 1).

## Методика исследований

Опробование выполнено с помощью специального сапропелевого бура, позволяющего извлекать полный разрез донных отложений без нарушения сплошности. После извлечения полученный керн делился на интервалы. Длина интервала опробования зависела от поставленной задачи и изменялась от 1 см до 1 м. Всего было отобрано 618 проб.

Все отобранные пробы донных отложений подвергнуты единой процедуре пробоподготовки, заключавшейся в их просушке в естественных условиях, дроблении и истирании до 200 меш.



Рис. 1. Схема размещения исследуемых водоемов на территории юга Томского области

Fig. 1. Scheme of the studied reservoirs location in the south of Tomsk region

Исследование химического состава на 28 элементов выполнено методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в лаборатории ядерно-геохимических исследований Национального исследовательского Томского политехнического университета (исполнители А.Ф. Судыко и Л.В. Богутская). Качество аналитических работ контролировалось путем сравнения со стандартными образцами [17] (табл. 1).

Таблица 1. Определение урана и тория в стандартных образцах методом ИНАА [17]

Table 1.	Determination of	uranium	and	thorium	in	standard
	samples by INAA					

	Уран/Uı	ranium	Торий/Thorium			
Станлартный	г/т (g/t)					
образец Standard sample	Паспортные данные Passport data	ЯГЛ ТПУ NGL TPU	Паспорт- ные данные Passport dat	ЯГЛ ТПУ NGL TPU		
Зола угля (Coal ash) ЗУК-1 ГСО 7125-94	$^{3,3\pm0,4}$	$3,2{\pm}0,71$	$5,8{\pm}1,0$	$5,6{\pm}0,23$		
Байкальский ил (Baikal silt) Бил-1 ГСО 7126–94	12,0±1,1	12,0±0,83	$12,7{\pm}1,3$	$12,7{\pm}0,34$		
Mopcкие отложения (Marine sediments) IAEA 315	3,20 (2,40-3,50)	$3,47{\pm}0,17$	6,64 (6,24–6,92)	$6,50{\pm}0,35$		
Mopские отложения (Marine sediments) IAEA SD-M-2/TM	2,49 (1,44-3,5)	$2,27{\pm}0,19$	8,15 (7,2-9,1)	8,69±0,29		
Гранат-биотитовый плагиогнейс (Garnet-biotite plagiogneiss) ГБП-1	0,8±0,1	$0,72{\pm}0,14$	$11,3{\pm}1,5$	11,2±0,40		

Также был проведен внутренний контроль качества аналитических работ путем повторного анализа дубликатов проб. На рис. 2 приведены результаты анализа проб донных отложений пруда в д. Осиновка, выполненные в 2004 и в 2008 гг., которые показывают хорошую воспроизводимость.

### Результаты исследований и их обсуждение

В результате исследований было установлено, что средние содержания урана (3,6 г/т) и тория (7,0 г/т) близки к средним оценкам для донных отложений Сибири [12], хотя и несколько выше их. Торий-урановое отношение близко к кларку для осадочных пород [18].

Таблица 2.	Среднее содержание урана и тория в донных осадках
	малых водоемов Томской области, г/т

 Table 2.
 Mean content of uranium and thorium in the sediments of small reservoirs of Tomsk region, g/t

Регион	Количество	elU		elTh		
(район, объект) исследования Region of the research	водоемов Number of water reservoirs	Содержа- ние Content	V, %	Содержа- ние Content	V, %	Th/U
Томская область, в том числе районы: Tomsk region, including districts:	299	$\frac{3,6\pm0,1}{0,535,2}$	95	<u>7,0±0,1</u> 0,413,7	33	1,9
Томский Tomsk	46	$rac{3,6\pm0,1}{0,66,6}$	24	$rac{6,5\pm0,1}{0,48,9}$	11	1,8
Кожевниковский Kozhevnikovo	50	<u>4,1±0,1</u> 0,935,2	112	$\frac{7,5\pm0,1}{2,211,5}$	29	1,8
Бакчарский Bakchar	6	$\frac{0,82\pm0,1}{0,52,1}$	82	$rac{7,2\pm0,1}{5,18,6}$	11	8,7
Шегарский Shegarsky	30	$rac{3,8\pm0,1}{1,731}$	146	$\frac{8,3\pm0,1}{1,313,7}$	38	2,2
Зырянский Zyryansky	40	$\frac{3,2\pm0,1}{0,512}$	65	$\frac{7,7\pm0,1}{4,311,3}$	21	2,4
Асиновский Asino	68	$\frac{3,1\pm0,1}{1,56,7}$	38	$\frac{7,8\pm0,1}{1,212,9}$	24	2,5
Кривошеинский Krivosheino	59	$\frac{2,6\pm0,1}{0,55,3}$	54	$\frac{7,2\pm0,1}{3,89,9}$	16	2,7

Примечание: V – коэффициент вариации, %; в знаменателе – максимальные и минимальные значения; в числителе – среднее значение; ± – ошибка определения среднего; жирным выделены значения урана выше среднего для Томской области

Note: V is the coefficient of variation, %; in the denominator – maximum and minimum values; in the numerator – average;  $\pm$  – error in determining the average; bold highlighted uranium values above the average for the Tomsk region.



Рис. 2. Внутренний контроль ИНАА г/т (2004, 2008 г. контроля)

Fig. 2. Internal control of INNA g /t (2004, 2008)

Анализ полученных данных показывает, что уран характеризуется достаточно неравномерным распределением (коэффициент вариации 95 %). Исключение составляют Томский и Асиновский районы, распределение урана в донных отложениях которых достаточно равномерно (коэффициент вариации 24 и 38 % соответственно). Коэффициент вариации распределения тория при этом достаточно выдержан и не превышает 38 % (табл. 2).

Как следует из табл. 2, полученные средние оценки содержания урана и тория в донных осадках озер и искусственных водоемов Асиновского, Зырянского и Кривошеинского районов очень схожи.

Шегарский и Кожевниковский район характеризуются более высокими концентрациями урана. В некоторых водоемах содержание урана превышает 20 г/т и в отдельных сечениях в разрезе донных отложений достигает максимума – 60 г/т. Содержание тория при высоких концентрациях урана выдержано, что указывает на его накопление преимущественно в составе обломочной фракции. На преимущественно кластогенное накопление тория в донных отложениях указывает и его содержание на уровне кларка для осадочных пород [18] при низкой дисперсии распределения.

Аномально низкое содержание урана при высоком торий-урановом отношении отмечено в донных отложениях водоемов Бакчарского района.

Содержание урана и тория в донных осадках водоемов и озер непосредственно зависит от их минерального состава, который, в свою очередь, определяется особенностями терригенной составляющей впадающих в него водотоков [12] и, вероятнее всего, разгрузкой подземных вод трещинного типа [15]. Анализ данных позволяет отметить, что в разных типах донных отложений среднее содержание как урана, так и тория значительно различается. Было выделено три типа осадков: торфянистый, терригенный и карбонатный. Терригенный тип донных осадков отличается повышенными содержаниями урана и тория относительно торфянистого и карбонатного и очень близок к среднему содержанию в осадочных горных породах [18]. Торфянистый тип осадков, относительно двух других изученных типов, заметно отличается высоким Th/U отношением, но обладает пониженным содержанием урана (табл. 3).

Во всех изученных озерах и искусственных водоемах донные осадки имеют смешанную природу радиоактивности, это отчетливо видно из графика, отражающего положение донных отложений в координатах Th–U (рис. 3).

Донные осадки изученных водоемов обладают достаточно выдержанным Th/U отношением и очень близки к средним оценкам их содержания в осадочных породах [18]. Это соответствует нормальному Th/U отношению в большинстве типов геологических образований земной коры. Исключением является Бакчарский район, который отличается достаточно высоким торий-урановым отношением (Th/U>5). Такие значения свойственны для районов с проявлением ториеносных геологических образований [19]. Томский и Кожевниковский районы характеризуются существенно более низким Th/U отношением (Th/U<2), что, скорее всего, указывает на накопление части урана за счет сорбции растворенного металла из питающих вод.

Таблица 3. Средние содержания урана и тория в различных типах донных отложений озер юга Томской области, г/т

Table 3.	Mean contents of uranium and thorium in different
	types of lake sediments in the south of Tomsk region, $g/t$

Cостав отложений Composition of the sediments	elU	elTh	Th/U
Терригенные (421 проба) Terrigenous (421 samples)	$\begin{smallmatrix} \underline{4,0\pm0,1} \\ 0,535,2 \end{smallmatrix}$	$\frac{7,2\pm0,1}{2,813,7}$	1,8
Карбонатные (129 проб) Carbonate (129 samples)	$\frac{2,8\pm0,1}{0,57,0}$	$\frac{3,6\pm0,1}{0,410,2}$	1,3
Торфянистые (68 проб) Peaty (68 samples)	$\begin{array}{c} \underline{1,6\pm0,1}\\ 0,45,5\end{array}$	$\frac{4,4\pm0,1}{1,49,5}$	2,8
Среднее для Сибири* Average for Siberia	<u>2,9</u> 0,034	<u>5,0</u> 0,411,9	1,7
Кларк** Mean concentration for sedimentary rocks	3,4	7,7	2,2

Примечание: в знаменателе – минимальные и максимальные значения; в числителе – среднее значение; ± – ошибка определения среднего; \* – среднее для Сибири [12]; \*\* – кларк для осадочных пород [18]

Note: in the denominator – minimum and maximum values; in the numerator – average value;  $\pm$  – error in determining the average; \* – average for Siberia [12]; \*\* – Clark for sedimentary rocks [18].



Районы Томской области:1) Бакчарский; 2) Асиновский; 3) Зырянский; 4) Шегарский; 5) Кожевниковский; 6) среднее для Томской области; 7) Томский; 8) Кривошеинский; 9) среднее содержание в осадочных породах по Григорьеву Н.А.; типы донных отложений: 10) терригенный; 11) карбонатный; 12) торфянистый.

- **Рис. 3.** Радиогеохимическая характеристика донных осадков малых водоемов юга Томской области и осадочных пород
- Fig. 3. Radiogeochemical characteristics of the sediments of small reservoirs in the south of Tomsk region and sedimentary rocks



Fig. 4. Schematic map of U(g/t) distribution in the sediments of small water reservoirs in the south of Tomsk region

Детальный анализ пространственного распределения урана в донных осадках изученных водоемов позволил оконтурить две зоны с повышенными уровнями его накопления (рис. 4).

Первая зона представлена ореолом высоких содержаний урана в южном блоке Кузнецкого Алатау в обрамлении Западно-Сибирской плиты (Зырянский район). Такая закономерность его распределения ранее отмечена во многих работах [1, 20].

Вторая зона повышенных концентраций урана откартирована в пределах двух районов Томской области (Кожевниковский и Шегарский) и представляет собой ореолы субмеридионального простирания. В пределах этих районов на фоне достаточно однородного распределения урана в донных отложениях изученных водоемов отчетливо выделяется Осиновско-Бабарыкинская радиогеохимическая аномальная зона, которая характеризуется повышенным концентрациями урана и пониженным Th/U отношением (рис. 4). Урановая аномалия ранее уже была отмечена в поверхностных водах и почвах в Кожевниковском районе Томской области [19].

Высокие содержания урана в донных осадках Зырянского района хорошо согласуются с наличием контрастных аномалий в зонах окисления бурых углей Козульского, Усманского и Яйского месторождений [21].

Пространственное распределение тория также достаточно неоднородно (рис. 5).

Контрастных аномалий у тория не выявляется, но так же, как и для урана, можно оконтурить зоны с относительно высокими его концентрациями. Одна зона простирается вдоль долины реки Чулым на востоке региона. Вторую зону можно проследит вдоль долины реки Оби в пределах Осиновско-Бабарыкинской радиогеохимически аномальной зоны.

В распределении Th/U отношения повышенными значениями характеризуется северная и северо-западная часть изученной области, наименьшими – южная и юго-восточная, в зоне обрамления Западно-Сибирской плиты (рис. 6).

На рис. 7 изображен график, который отражает положение донных осадков в координатах Th-Uвсех изученных водоемов юга Томской области (рис. 7). Th/U-отношение в донных осадках изученных водоемов в основном близко к 2. Так как донные осадки выделенной Осиновско-Бабарыкинской аномальной зоны отличаются достаточно низким Th/U отношением,  $Th/U \le 1$ , это говорит о том, что идет преимущественно концентрирование урана по сравнению с торием (рис. 7). Одним из более вероятных способов концентрации урана в донных осадках считается его сорбция на органическом веществе. Торий отличается существенно более низкой миграционной способностью в водах в условиях зоны гипергенеза по сравнению с ураном.

Повышенные содержания урана в Осиновско-Бабарыкинской радиогеохимически аномальной зоне могут быть связаны с наличием уранового оруденения в пределах буготакского разлома, сопровождающегося гидротермалитами с радиоактивностью 20–330 мкР/ч, на фоне 3–16 мкР/ч для основных типов осадочных пород района. Литогеохимическая аномалия совмещена с гидрогеохимической. Эти воды служат источником урана для



----- Тектонические разломы

- Рис. 5. Схематическая карта распределения Тһ в донных осадках малых водоемов юга Томской области, г/т
- Fig. 5. Schematic map of Th distribution in the sediments of small water reservoirs in the south of Tomsk region, g/t



**Рис. 6.** Схематическая карта пространственной изменчивости величины Th/U отношения в донных осадках малых водоемов юга Томской области, г/т

Fig. 6. Schematic map of the Th/U ratio spatial variability in the sediments of small water reservoirs in the south of Tomsk region, g/t

торфяников, в которых он накапливается за счет биогенной аккумуляции и сорбции в илистой фракции донных осадков [22].

Повышенные концентрации урана могут быть связаны с тем, что происходит выветривание радиогеохимически специализированных комплексов горных пород в Кузнеко-Алатаусской и Томь-Колыванской складчатых зонах, снос и концентрирование данного элемента в осадочных отложениях вдоль южного обрамления Западно-Сибирской плиты. Подтверждением аномальных концентраций урана в донных отложениях является схожий механизм накопления аномальных концентраций урана в многочисленных торфяниках региона [22].

Возможной причиной повышенного содержания урана может быть разгрузка подземных вод в зоне Колыванского разлома в Колывань-Томской складчатой зоне, где в зонах тектонических нарушений в подземных водах установлены аномальные концентрации урана (до 5,4·10<sup>-5</sup> г/л) [23]. Как известно, подземные воды, взаимодействуя с урановыми концентрациями, могут извлекать уран из пород либо путем растворения урановых минералов, либо путем выщелачивания урана, находящегося в рассеянном состоянии. Вследствие хорошей миграционной способности уран может переносится на большие расстояния от места своего обогащения [24].



**Рис. 7.** Радиогеохимическая характеристика донных отложений Томской области

Fig. 7. Radiogeochemical characteristics of bottom sediments in Tomsk region

В Шегарском районе урановые аномалии пространственно приурочены к гранитоидам позднепалеозойского фундамента.

Для детального изучения Осиновско-Бабарыкинской радиогеохимически аномальной зоны проведен поинтервальный отбор в разрезе вертикального профиля донных осадков отдельных водоемов. Вертикальное распределение урана и тория в донных отложениях водоема в деревне Осиновка Кожевниковского района представлено на рис. 8.

Анализ графиков вертикального распределения большой группы химических элементов в донных отложениях озера, находящегося в деревне Осиновка, позволяет сделать выводы, что все изученные элементы своими средним значениям очень близки или совпадают с региональным фоном для донных отложений. Исключением является уран, средние значения которого превышают среднюю оценку для Томской области

Осиновская урановая аномалия прослеживается и в д. Малиновка Кожевниковскго района. Подпрудный водоем располагается севернее на расстоянии 18 км от д. Осиновка на реке Кумлова. На этой же реке располагается и пруд в д. Осиновке. Вертикальное распределение урана и тория представлено на рис. 9.

Возраст урановой аномалии молодой, так как радиоактивное равновесие между U и Ra не установилось. Это говорит о том, что поступление урана происходило не за счет минеральной массы, а с современными водными растворами. Характер распределения элементов позволяет заключить, что



**Рис. 8.** Вертикальное распределение а) U и б) Th в колонке донных отложений озера в деревне Осиновка

Fig. 8. Vertical distribution of a) U and b) Th in the lake sediments column in Osinovka village



**Рис. 9.** Вертикальное распределение а) U и б) Th в колонке донных отложений озера в деревне Малиновка **Fig. 9.** Vertical distribution of a) U and b) Th in the lake sediments column in Malinovka village

урановая аномалия монометальная и, скорее всего, имеет гидрогенное происхождение.

#### Заключение

В результате проделанной работы по изучению радиогеохимических особенностей донных осадков озер и искусственных водоемов на территории юга Томской области установлено, что среднее содержание урана и тория в них сопоставимо с кларком для осадочных пород.

Донные отложения исследуемых водоемов имеют высокий коэффициент вариации для урана, что указывает на его неравномерное распределение. При этом торий имеет однородную совокупность. Высокий коэффициент вариации распределения урана обусловлен различными факторами: неоднородным химическим составом вод исследуемых водоемов и региональными радиогеохимическими особенностями области питания бассейна осадконакопления.

Оценка изучения средних содержаний естественных радионуклидов в донных осадках озер и

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Домаренко В.А., Чернев Е.М., Соболев И.С. Возможности обнаружения уранового оруденения гидрогенного типа на востоке Западно-Сибирской плиты // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 11. – С. 24–32.
- Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Сухих Ю.И. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 216 с.

искусственных водоемов на территории юга Томской области позволяет резюмировать, что их состав значительно отличается в различных минеральных типах.

Минимальные содержания урана установлены в торфянистом типе, а максимальные – в терригенном.

Латеральное распределение урана в донных осадках позволяет выделить зоны с высокими уровнями его концентрирования. Первая зона простирается вдоль южного обрамления Западно-Сибирской плиты. Вторая радиогеохимически аномальная зона концентрации урана пространственно совпадает с полями развития гранитов позднепалеозойского комплекса. Предполагается, что формирование этой аномалии обусловлено разгрузкой подземных вод трещинного типа Колыванского разлома, где установлены аномальные концентрации урана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–55–80015.

- Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка экологогеохимического состояния г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
- Aichner B., Herzschuh U., Wilkes H. Influence of aquatic macrophytes on the stable carbon isotopic signatures of sedimentary organic matter in lakes on the Tibetan Plateau // Org Geochem. 2010. V. 41. № 7. P. 706–718.
- 5. Machowski R., Rzetala M., Rzetala M. Chemical composition of the surface layer of bottom sediments in the northern part of the

chott el jerid periodic lake in Tunisia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – Albena, Bulgaria, 2017. – V. 17. – P. 89–96.

- Edgington D.N. et al. Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Baikal from <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb in sediment cores // Nature. - 1991. - V. 350. - № 6319. -P. 601-604.
- Hydro-chemical processes in Lake Qinghai throughout climate warming: in situ investigations of the largest lake in China / C.F. Jin, S.J. Li, H.L. Zhang, J.F. Liu, W. Chen, Y.J. Jiang // Nat Sci. - 2016. - V. 8. - № 12. - P. 574-590.
- Bu-Li Cui, Xiao-Yan Li Characteristics of stable isotopes and hydrochemistry of river water in the Qinghai Lake Basin, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 73. № 8. P. 4251–4263.
- 9. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 486 p.
- Alemdaroglu T., Onur E., Erkakan F. Trace metal levels in surface sediments of Lake Manyas, Turkey and tributary rivers // Int. J. Environ. Stud. - 2003. - № 60. - P. 287-298.
- Paleo-limnological reconstruction of historical atmospheric lead and mercury deposition at Lake Tahoe, California-Nevada / A.C. Heyvaert, J.E. Reuter, D.G. Sloton, C.R. Goldman // Environ. Sci. Tech. - 2000. - № 34. - P. 3588-3597.
- Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2011. – 307 с.
- Elevated uranium concentrations in Lake Baikal sediments: burial and early diagenesis / L.M. Och, B. Mueller, C. März et al. // Chemical Geology. - 2016. - V. 441. - P. 92-105.
- Субетто Д.А., Прыткова М.Я. Донные отложения разнотипных водоемов. Методы изучения. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. – 89 с.
- Иванов А.Ю. Закономерности распределения химических элементов в вертикальном профиле донных отложений слабопроточных водоемов Томского района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 88–101.
- Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 248 с.

- Судыко А.Ф. Определение урана и тория в природных объектах нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. II Междунар. конф. – Томск: Изд-во «Тандем-Арт», 2004. – С. 587–592.
- Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
- Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 1997. – 384 с.
- 20. Соболев И.С., Рихванов Л.П., Лященко Н.Г. О возможности использования комплекса радиогеохимических методов при прогнозировании и поисках глубокозалегающих урановых месторождений гидрогенного типа // Актуальные проблемы урановой промышленности. – Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции – Алматы, Казахстан, 14–16 сент. 2010. – Алматы: Adem Print, 2010. – С. 380–385.
- Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) / S.I. Arbuzov, A.V. Volostnov, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok // Int. J. Coal Geol. - 2011. - V. 86. -P. 318-328.
- 22. Росляков Н.А., Бобров В.А., Белянин Д.К. К вопросу об источниках радионуклидов в торфяниках юга Западной Сибири // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Материалы V международной научно-практической конференции, 15–18 октября 2008 г. – Семей: Изд-во Семипалатинского го государственного педагогического института, 2008. – С. 346–348.
- Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 461–464.
- Токарев А.Н., Щербаков А.В. Радиогидрогеология. М.: Государственное научно-техническое издание литературы по геологии и охране недр, 1956. – 263 с.

Поступила: 28.01.2019 г.

## Информация об авторах

**Иванов** А.Ю., старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Арбузов С.И.*, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.
UDC 556.331:551.312:546.79(571.16)

# GEOCHEMISTRY OF URANIUM AND THORIUM IN BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL ARTIFICIAL WATER RESERVOIRS AND LAKES IN THE SOUTH OF THE TOMSK REGION

# Andrey Y. Ivanov<sup>1</sup>,

lvanov-13@mail.ru

## Sergey I. Arbuzov<sup>1</sup>,

Siarbuzov@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** Radioactive elements are effective markers of the bottom sediments of Tomsk region.

**The aim** of the research is to study radiogeochemical features of the sediments of small water reservoirs in the south of Tomsk region. **The object** of the study is the bottom sediments of small reservoirs in the south of Tomsk region.

**Methods:** detailed sampling of the sediments of small reservoirs, multi-element instrumental neutron activation analysis, and data processing and interpretation by applied statistics methods.

**Results.** We carried out radio-geochemical study of the sediments of small water reservoirs in the south of Tomsk region. Mean contents of uranium and thorium in the sediments of small reservoirs in the south of the Tomsk region were estimated. The studies showed that the uranium and thorium contents depend on the type of sediments. The highest uranium content was found in the terrigenous type of the sediments, the lowest one was found in the peat. Two zones with high uranium content were found. The first zone is spatially coinsine with Kozhevnikovsky and Shegarsky districts of Tomsk region. Osinovo-Babarykinskaya anomalous zone of uranium accumulation in this region is clearly visible, which is well seen in the submeridional direction. Within Kozhevnikovo district, it can be associated with underground water discharge in the area of the Kolyvanskiy fault. In Shegarsky district, the high uranium contents spatially relate to granitoids of the late Paleozoic Foundation. The second zone of uranium accumulation extends along the southern frame of the West Siberian plate within the Kuznetsk-Alataussky block.

#### Key words:

Bottom sediments, uranium and thorium, radiogeochemical studies, zone of anomalous uranium accumulation, vertical distribution.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-55-80015.

#### REFERENCES

- Domarenko V.A., Chernev E.M., Sobolev I.S. Vozmozhnosti obnaruzheniya uranovogo orudeneniya gidrogennogo tipa na vostoke Zapadno-Sibirskoy plity [Detection capabilities of hydrogenic uranium mineralization in the East of the West Siberian plate]. *Exploration and protection of subsoil*, 2010, no. 11, pp. 24–32.
- Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sukhikh Yu.I. Ekologo-geokhimicheskie osobennosti prirodnykh sred Tomskogo rayona i zabolevaemost naseleniya [Ecogeochemical features of natural environments of Tomsk region and diseases of the population]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 216 p.
- Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhornyak L.V. Otsenka ekologogeokhimicheskogo sostoyaniya g. Tomska po dannym izucheniya pyleaerozoley i pochv [Assessment of ecological and geochemical state of Tomsk city according to the study of dust aerosols and soils]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 264 p.
- Aichner B., Herzschuh U., Wilkes H. Influence of aquatic macrophytes on the stable carbon isotopic signatures of sedimentary organic matter in lakes on the Tibetan Plateau. Org Geochem., 2010, vol. 41, no. 7, pp. 706-718.
- Machowski R., Rzetala M., Rzetala M. Chemical composition of the surface layer of bottom sediments in the northern part of the chott el jerid periodic lake in Tunisia. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Albena, Bulgaria, 2017. Vol. 17, pp. 89–96.
- Edgington D.N. Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Baikal from 137Cs and 210Pb in sediment cores. *Nature*, 1991, vol. 350, no. 6319, pp. 601–604.
- 7. Jin C.F., Li S.J., Zhang H.L., Liu J.F., Chen W., Jiang Y.J. Hydro-chemical processes in Lake Qinghai throughout climate war-

ming: in situ investigations of the largest lake in China. Nat Sci., 2016, V.8. – № 12. – P. 574–590.

- Bu-Li Cui, Xiao-Yan Li. Characteristics of stable isotopes and hydrochemistry of river water in the Qinghai Lake Basin, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, no. 8, pp. 4251–4263.
- 9. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer-Verlag, 1979. 486 p.
- Alemdaroglu T., Onur E., Erkakan F. Trace metal levels in surface sediments of Lake Manyas, Turkey and tributary rivers. *Int. J. Environ. Stud.*, 2003, no. 60, pp. 287-298.
- Heyvaert A.C., Reuter J.E., Sloton D.G., Goldman C.R. Paleolimnological reconstruction of historical atmospheric lead and mercury deposition at Lake Tahoe, California-Nevada. *Environ. Sci. Tech.*, 2000, no. 34, pp. 3588-3597.
- Strakhovenko V.D. Geokhimiya donnykh otlozheniy malykh kontinentalnykh ozer Sibiri. Dis. Dokt. nauk [Geochemistry of bottom sediments of small continental lakes of Siberia. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2011. 307 p.
- Och L.M., Mueller B., März C. Elevated uranium concentrations in Lake Baikal sediments: Burial and early diagenesis. *Chemical Geology*, 2016, vol. 441, pp. 92–105.
- Subetto D.A. Prytkova M.Ya. Donnye otlozheniya raznotipnykh vodoemov. Metody izucheniya [Bottom sediments of different types of water reservoirs. Research methods]. Petrozavodsk, Karelskiy nauchny tsentr RAN, 2016. 89 p.
- Ivanov A.Yu. Regularities of distribution of chemical elements in the sediment vertical profiles of low-flow reservoirs of Tomsk region. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 88-101.

- Savichev O.G. Vodnye resursy Tomskoy oblasti [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2010. 248 p.
- 17. Sudyko A.F. Opredelenie urana i toriya v prirodnykh obektakh neytronno-aktivatsionnym metodom [Determination of uranium and thorium in natural objects by neutron activation method]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment]. Tomsk, Tandem-Art Publ., 2004. pp. 587–592.
- Grigorev N.A. Srednee soderzhanie khimicheskikh elementov v gornykh porodakh, slagayushchikh verkhnyuyu chast kontinentalnoy kory [Mean contents of chemical elements in the rocks composing the upper part of the continental crust]. *Geokhimiya*, 2003, no. 7, pp. 785–792.
- Rikhvanov L.P. Obshchie i regionalnye problemy radioekologii [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPU Publ. house, 1997. 384 p.
- 20. Sobolev I.S., Rikhvanov L.P, Lyashchenko N.G. O vozmozhnosti ispolzovaniya kompleksa radiogeokhimicheskikh metodov pri prognozirovanii i poiskakh glubokozalegayushchikh uranovykh mestorozhdeniy gidrogennogo tip [On possibility of using the complex of radiogeochemical methods for forecasting and exploration of deep hydrogenic uranium deposits]. Aktualnye problemy

uranovoy promyshlennosti [Actual problems of the uranium industry]. Almaty, Adem Print, 2010. pp. 380-385.

- Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *Int. J. Coal Geol.*, 2011, vol. 86, pp. 318–328.
- 22. Roslyakov N.A., Bobrov V.A., Belyanin D.K. K voprosu ob istochnikakh radionuklidov v torfyanikakh yuga Zapadnoy Sibiri [The issue of sources of radionuclides in the peatlands of the south of Western Siberia]. *Tyazhelye metally i radionuklidy v* okruzhayushchey srede [Heavy metals and radionuclides in the environment]. Semey, SGPI Publ. house, 2008. pp. 346-348.
- Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Estestvennye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of Novosibirsk region]. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka [Radioactivity and radioactive elements in the human environment]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013, pp. 461–464.
- Tokarev A.N., Shcherbakov A.V. Radiogidrogeologiya [Radiohydrogeology]. Moscow, GNTI Publ., 1956. 263 p.

Received: 28 January 2019.

### Information about the authors

Andrey Y. Ivanov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

#### УДК 622.276

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО ГЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

## Нажису<sup>1</sup>,

Narisu33@126.com

Ерофеев Владимир Иванович<sup>1</sup>,

erofeevvi@mail.ru

**Лу Цзиньлун**<sup>2</sup>, 1461284070 @gg.com

## Ван Вэй<sup>2</sup>,

739497456 @gg.com

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Северо-восточный нефтяной университет, Китай, 163000, г. Дацин, ул. Развития, 199.

**Актуальность.** Полимерное заводнение широко применяется на практике при разработке нефтяных месторождений. Высококонцентрированные растворы полимера с высокой массовой концентрацией обладают повышенной вязкоэластичностью, но с увеличением массовой концентрации полимерного раствора возникает проблема о совместимости между размером агрегата молекул полимера и размером пор в пласте. Сг<sup>3+</sup> полимерный гель, основанный на внутримолекулярном сшивании молекул, имеет меньший размер агрегата и хорошую совместимость с пластом, поэтому очень актуальными являются исследования эффекта гелеобразования.

**Цель:** исследование фильтрационных и реологических свойств водного геля на основе полиакриламида в присутствии ацетата хрома для повышения нефтеотдачи платов.

**Методы:** физическое моделирование процесса нефтевытеснения и процесса фильтрации жидкости при пластовых условиях на фильтрационной установке, определение вязкости полимерного геля на вискозиметре Брукфилда DV-II, измерение размера полимерного молекулярного клубка Dh на установке Brookhaven BI-200SM, широкоугольная динамическая/статическая система рассеяния света (Brookhaven Instruments Cop., США), определение вязкоэластичности с помощью реометра Harke10.

**Результаты.** Регулированием массовой концентрации полимерного раствора, степени минерализации воды и соотношения содержания полимера к хрому (w(П/Cr<sup>3+</sup>)) можно получить Cr<sup>3+</sup> полимерную гелевую систему, основанную на внутримолекулярном сшивании молекул с меньшим размером молекулярной агрегации и большим фильтрационным сопротивлением. После реакции внутримолекулярного сшивания полимерного раствора, с одной стороны, вязкоэластичность системы значительно улучшается и коэффициент вытеснении нефти из пластов увеличивается. С другой стороны, реакция внутримолекулярного сшивания молекул снижает гибкость агрегатов полимерной молекулы, повышает их жесткость, ухудшает их деформируемость в процессе прохождения через поры и увеличивает задержки молекул, полимера в слое с высокой проницаемостью пласта. Сг<sup>3+</sup> полимерная гелевая система не только обладает хорошей приемистостью, но может также постепенно достигать более высокого давления нагнетания, за счет этого увеличивается коэффициент охвата пласта. В итоге коэффициент извлечения нефти с применением системы полимерного геля становится выше, чем коэффициент извлечения нефти из пласта с использованием системы полимерного раствора.

#### Ключевые слова:

Полимерный гель, внутримолекулярное сшивание полимерных молекул, вязкоэластичность, размер молекулярного клубка, фильтрационное сопротивление, повышение нефтеотдачи.

## Введение

Известно, что, когда разработка нефтяного месторождения выходит на среднюю и позднюю стадии эксплуатации из-за неоднородности пласта, большая часть нагнетаемой воды поглощается слоем с высокой проницаемостью и микроскопическими порами в слое и это приводит к снижению коэффициента охвата и вытеснения нефти [1–3]. Для увеличения коэффициента охвата и вытеснения нефти раствор полимера и полимерного геля обычно добавляют в скважину нагнетания воды и блокируют слой с высокой проницаемостью [4, 5]. Высококонцентрированный полимерный раствор значительно уменьшить содержание остаточной нефти в залежи [6, 7]. Также с увеличением массовой концентрации полимерного раствора увеличивается физическое сцепление между молекулами полимера и увеличивается размер агрегатов молекул полимера и неизбежно возникает проблема совместимости между размером агрегата молекул полимера и размером пор в пласте [8–11]. Поэтому полимерные гелевые системы, основанные на внутримолекулярном сшивании молекул, имеют меныший размер агрегата и хорошую совместимость с пластом и за счет этого могут проникать более

обладает высокой вязкоэластичностью и может

глубоко в пласт [11–16]. В связи с этим, принимая геологические характеристики пласта и свойства флюидов месторождения Дацин (КНР) в качестве исходных данных, в данной работе оптимизированы системы полимерного геля, основанные на внутримолекулярном сшивании с меньшим размером молекулярной агрегации и большим фильтрационным сопротивлением, а также исследованы их свойства по вязкоэластичности, размерам молекулярного клубка и эффекту вытеснения нефти из пласта (керна).

### Экспериментальная часть

Материалы эксперимента. Полимер представляет собой сухой порошок частично гидролизованного полиакриламида, полученный Daging Refining & Chemical Company. Относительная молекулярная масса 2500.104, эффективное содержание 88 %. Сшивающий агент представляет собой ацетат хрома, синтезированный в емкости с эффективным содержанием Cr<sup>3+</sup> 1,52 %. Модификатор минерализации представляет собой NaCl, эффективное содержание 100 %. Образец модельной нефти с вязкостью 9,8 мПа с при 45 – состоял из керосина и обезвоженной нефти Дацинского нефтяного месторождения. Вода для эксперимента использовалась из нагнетательных скважин Дацинского нефтяного месторождения, массовые концентрации (K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ćl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> и  $HCO_3^{-}$  составляют 1680, 40, 15, 1046, 134, 330 и 2013 мг/л соответственно. Общая степень минерализации составляет 5258 мг/л, а значение рН равно 8,5.

Керны. В эксперименте были использованы искусственные керны, изготовленные из кварцевых песков, цементированных эпоксидной смолой. Проницаемость искусственных кернов измерялась газом. Керны с различной проницаемостью были изготовлены путем использования смесей кварцевого песка с различным размером зерна и содержанием эпоксидной смолы. В экспериментах по фильтрации использовались цилиндрические керны, размер составлял  $\emptyset 2,5 \times 10$  см, проницаемость равна  $1300 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> (рис. 1, *a*). Керны, используемые для проведения экспериментов по вытеснению нефти из керна, были однородными по слоям и длинными, прямоугольной формы, размером  $4,5 \times 4,5 \times 30$  см. Керн состоял из трех слоев: с высокой, средней и низкой проницаемостью (рис. 1, *б*). Проницаемость слоев составляла  $2800 \cdot 10^{-3}$ ,  $8002 \cdot 10^{-3}$  и  $200 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> соответственно [17–19].

Аппаратура. Вязкость был измерена с использованием вискозиметра Брукфилд DV-II, температура испытания составляла 45 °С. Размер полимерного молекулярного клубка Dh был измерен на установке Brookhaven BI-200SM, широкоугольной динамической/статической системе рассеяния света (Brookhaven Instruments Cop., США). Вязкоэластичность измерялась с помощью реометра Harke100, температура испытания составляла 45 °С. Характеристики потока полимерного раствора были испытаны с использованием устройства для фильтрационного эксперимента. Экспериментальная установка состояла из насоса, датчика давления, держателя керна, ручного насоса для создания горного давления, промежуточного контейнера и других деталей. За исключением насоса и ручного насоса, остальные детали были помещены в термостат с температурой 45 °С. Фильтрационные эксперименты проводили при температуре 45 °С (рис. 2).

Метод синтеза полимерного геля. Определенное количество полимера постепенно при перемешивании добавляли в воду, которая содержала модификатор с различной степенью минерализации, затем перемешивали еще 2 ч, чтобы полностью ра-



Puc. 1. Структуры искусственного керна Fig. 1. Structure of the artificial core



Рис. 2. Принципиальная схема установки для определения фильтрации жидкости и коэффициента извлечения нефти при моделировании пластовых условий: 1 – химический стакан; 2 – ручной насос; 3 – поршневой насос; 4 – контейнер с водой; 5 – контейнер с полимером; 6 – датчик; 7 – кернодержатель; 8 – мерник

Fig. 2. Schematic diagram of the installation for studying filtration of liquids and oil recovery factor in simulation of reservoir conditions: 1 is the beaker; 2 is the manual pump; 3 is the plunger pump; 4 is the container with water; 5 is the container with polymer; 6 is the plunger sensor; 7 is the core holder; 8 is the collector

створился полимер. После этого при перемешивании было добавлено определенное количество сшивающего агента. Затем эффективность полимерного раствора и его свойства были испытаны в экспериментах после проведения эксперимента в течение 50 мин при температуре резервуара 45 °C.

#### Результаты и их обсуждение

Оптимизация состава полимерного геля. В качестве основных факторов при проведении эксперимента были выбраны: концентрация полимера (c, (мг·л<sup>-1</sup>)), степень минерализации воды (w(NaCl)) и соотношение содержания полимера к содержанию хрома (w(П/Сг<sup>3+</sup>)). Результаты экспериментов и соответствующий анализ диапазона R представлены в табл. 1, 2 соответственно. В табл. 3 представлены в табл. 1, 2 соответственно. В табл. 3 представлены в оффициент сопротивления и коэффициент остаточного сопротивления полимерного раствора. На рис. 3 показаны зависимости нагнетательного давления и относительного объема закачки  $V_{\text{авч}}/V_{\text{пор}}$  воды и растворов полимерного геля ( $V_{\text{зач}}$  – объем закачки жидкости,  $V_{\text{пор}}$  – объем пор керна).

Характеристики фильтрации полимерных растворов и полимерных гелей обычно оценивают по коэффициенту сопротивления и коэффициенту остаточного сопротивления, которые являются техническими индикаторами, описывающими количество удерживания химического вытесняющего агента в пористой среде. Определение коэффициентов  $F_R$  и  $F_{RR}$  проводили по формулам (1), (2) [20]:

$$F_{R} = \frac{\partial P_{2}}{\partial P_{1}}; \tag{1}$$

$$F_{RR} = \frac{\partial P_3}{\partial P_1},\tag{2}$$

где  $F_R$  – коэффициент сопротивления, ед.;  $F_{RR}$  – коэффициент остаточного сопротивления, ед.;  $\delta P_1$  – перепад давления в процессе заводнения, Па;  $\delta P_2$  – перепад давления в процессе химического заводнения, Па;  $\delta P_3$  – перепад давления в процессе последующего заводнения, Па.

Таблица 1.	Результаты фильтрационных экспериментое
Table 1.	Results of seepage experiment

Номер эксперимента Experiment number	Массовая концентра- ция полимерного раствора, c, мг·л <sup>-1</sup> Mass concentration of polymer solution, c, mg/L	w(NaCl), %	$w(\Pi/\mathrm{Cr}^{3+})$	Вязкость, $\mu$ , мПа·с Viscosity, $\mu$ , mPa·s	Коэффициент сопротивления Resistance coefficient	Коэффициент остаточ- ного сопротивления Residual resistance coefficient
1	700	0	4	16,1	7,5	13,0
2	700	0,2	8	14,1	7,0	5,6
3	700	0,4	16	13,15	5,3	3,4
4	700	0,6	32	11,8	4,5	3,1
5	1000	0	8	36	10,6	8,9
6	1000	0,2	4	27,5	316,5	316,5
7	1000	0,4	32	26,8	6,6	2,6
8	1000	0,6	16	23,2	7,3	6,1
9	1300	0	16	52,3	28,0	7,1
10	1300	0,2	32	44,1	11,4	5,4
11	1300	0,4	4	38,8	391,7	433,3
12	1300	0,6	8	33,2	44,3	32,9
13	1600	0	32	79,7	12,9	5,7
14	1600	0,2	16	60,2	17,0	7,8
15	1600	0,6	4	49,9	391,7	433,3
16	1600	0,4	8	54,8	70,0	106,4

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что массовая концентрация полимера, w(NaCl) и  $w(\Pi/Cr^{3+})$  влияют на эффект гелеобразования и характеристики фильтрации. С изменением w(NaCl) и  $w(\Pi/Cr^{3+})$  вязкость полимерного раствора с разной массовой концентрацией уменьшается, что указывает на то, что в растворе не было межмолекулярного сшивания молекул полимера. В некоторых экспериментах в полимерном растворе происходила реакция внутримолекулярного сшивания молекул полимера (рис. 4) и получалась система с хорошим гелеобразующим эффектом. Однако по сравнению с той же массовой концентрацией раствора полимера коэффициент сопротивления и остаточный коэффициент сопротивления значительно увеличивался, а давление на этапе последующего заводнения керна было выше, чем давление на стадии полимерного заводнения.

В нормальных условиях реакции сшивания молекул полимера сшивающий агент ацетата хрома, добавленный к полимерному раствору, сначала ионизируется в ион хрома и ацетатный ион, далее ион хрома гидролизуется и образуется полиядерный гидроксильный лиганд, затем через реакции координации полиядерного гидроксильного лиганда и карбоксильной группы в полимерной цепи образуется полимерный гель. Однако в данном эксперименте вода, используемая для подготовки раствора полимера, представляет собой выделенную из нефтесодержащей жидкости щелочную сточную воду нефтяного месторождения, поэтому ион хрома, полученный ацетатным гидролизом, сначала реагирует с ОН<sup>-</sup> и образует комплекс Cr(OH)<sub>3</sub>. Поскольку Cr(OH)<sub>3</sub> практически не ионизируется для образования ионов хрома в водном растворе, а это означает, что количество ионов хрома в растворе будет уменьшаться.

Таблица 2. Анализ диапазона коэффициента сопротивления и коэффициента остаточного сопротивления

residual resistance coefficient										
Параметры Parameters	Фактор Factor	Массовая концентрация по- лимерного раствора, c, мг·л <sup>-1</sup> Mass concentration of polymer solution, c, mg/L	w(NaCl)/%	$w(\Pi/\mathrm{Cr}^{3+})$						
	K1	6,1	14,8	276,8						
Коэффициент сопротивления Resistance coefficient	K2	85,2	87,9	33,0						
	K3	118,8	118,4	14,4						
	K4	122,9	31,5	8,8						
	R1	112,7	103,6	268,0						

6,3

83.5

119,7

138,3

132,0

8,7 299,0

83,8 38,4

209,5 292,9

6,1

4,2

218,2

37,1

K5

K6

K7

K8

R2

Коэффициент

остаточного

сопротивления

Residual resistance

coefficient

 Table 2.
 Analysis of the range of resistance coefficient and residual resistance coefficient

Когда отношение  $w(\Pi/Cr^{3+})$  большое в полимерном растворе, из-за влияния ОН<sup>-</sup>-групп в воде, количество полиядерных гидроксильных лигандов, образующихся при гидролизе ионов хрома в растворе, невелико, и уменьшается вероятность протекания реакции сшивания. В данном случае изменение массовой концентрации полимера или степени минерализации мало влияет на улучшение эффекта гелеобразования. Когда отношение  $w(\Pi/Cr^{3+})$  небольшое в растворе полимера, хотя ОН<sup>-</sup>-группы в приготовленной воде снижают концентрацию ионов хрома, количество ионов хрома, присутствующих в растворе, относительно высокое, а количество многоядерного гидроксильного

лиганда, образующегося при гидролизе, также относительно большое. В этом случае повышение концентрации полимера и увеличение степени минерализации воды будут повышать эффект гелеобразования. Это связано с тем, что, когда массовая концентрация полимера низкая, расстояние между молекулами полимера, диспергированными в растворе, большое, степень сцепления низкая, а размер молекулярного агрегата полимера будет небольшой. В данном случае повышение степени минерализации приготовленной воды приведет к сжатию молекулярной цепочки полимера и уменьшению внутреннего пространства у молекулы полимера. Поэтому полиядерному гидроксильному лиганду становится трудно проникать внутрь полимерной молекулярной цепи и вероятность реакции сшивания уменьшается. Однако с увеличением массовой концентрации полимера размер агрегатов его молекул увеличивается, внутреннее пространство у молекул полимера повышается и полиядерные гидроксильные лиганды легко проникают внутрь полимерных молекулярных цепей [21].

Таблица 3. Коэффициент сопротивления и коэффициент остаточного сопротивления полимерного раствора

Table 3.	Resistance coefficient and residual resistance coeffici-
	ent of polymer solution

Полимер Polymer	Maccoвая концентрация по- лимерного раствора, с, мг- $\pi^{-1}$ Mass concentration of polymer solution, c, mg/L	Вязкость µ, мПа·с Viscosity, µ, mPa·s	Коэффициент сопротивления Resistance coefficient	Коэффициент остаточного сопротивления Residual resistance coefficient
Частично гидролизован-	700	16,1	5,6	1,4
ный полиакриламид	1000	36	5,6	1,8
Partially hydrolyzed	1300	52,3	5,4	3,8
polyacrylamide	1600	79,7	13,3	2,9

Согласно теории растворов Флори-Хаггинса [22], реакция сшивания молекул полимера происходит в пределах диапазона «клетка» вокруг полиядерного гидроксильного лиганда, поэтому происходит ли реакция сшивания, зависит от того, будут ли две карбоксильные группы полимера находиться в «клетке» вокруг полиядерного гидроксильного лиганда или на достаточном расстоянии, на котором может протекать реакция сшивания молекул полимера. В этом случае соответствующее увеличение степени минерализации воды хотя и вызовет определенное сжатие молекулярной цепи полимера и уменьшение внутреннего пространства полимерной молекулы, это мало повлияет на процесс миграции полиядерного гидроксильного лиганда в молекулярную цепь полимера и наоборот, сжатие молекулярной цепи также в некоторой степени будет приводить к уменьшению расстояния между карбоксильной группой и полиядерными гидроксильными лигандами. Таким образом, соот-



**Puc. 3.** Зависимости нагнетательного давления и относительного объема закачки  $V_{sav}/V_{nop}$  воды и растворов полимерного геля **Fig. 3.** Dependence of injection pressure and relative volume  $V_{ini}/V_{nore}$  of injection water and solutions of the polymer gel

ветствующее повышение степени минерализации воды увеличивает вероятность появления двух карбоксильных групп в «клетке» вокруг полиядерного гидроксильного лиганда и улучшает эффект гелеобразования.

Кроме того, после протекания реакций внутримолекулярного сшивания полимерных молекул под действием сшивающего агента жесткость полимерного молекулярного клубка увеличивается, а способность деформирования молекулы полимера становится хуже при прохождении через поры керна, в результате этого возникают механические напряжения, что приводит к задержкам молекул полимера в порах керна и увеличению коэффициента сопротивления. На последующей стадии заводнения, с связи с тем, что ионы хрома, которые не участвовали в реакции сшивания молекул полимера в керне, были удалены с добываемой жид-



Рис. 4. Принципиальная схема внутримолекулярного сшивания полимеров

Fig. 4. Schematic diagram of intramolecular cross-linking of polymers

костью, степень минерализации жидкости уменьшилась. В результате внутреннее пространство молекул полимера уменьшилось, толщина двойного электрического слоя полимерной цепи и размер молекулярного клубка полимера увеличились. Также усиливается способность закупоривания пор и каналов в керне и возникает уникальное состояние – когда коэффициент остаточного сопротивления становится выше коэффициента сопротивления, которое очень благоприятно для увеличения нефтеотдачи пластов с помощью полимерного заводнения.

В табл. 4 представлены результаты изменения вязкости полимерного геля со временем, номер экспериментов совпадает с фильтрационными экспериментами. Из табл. 4 следует, что степень минерализации раствора и  $w(\Pi/Cr^{3+})$  влияют на вязкость полимерного геля. После подготовки раствора (меньше 1h), с увеличением степени минерализации раствора, вязкость полимерного геля уменьшается. В экспериментах 6, 11, 15 и 16 вязкость полимерного геля увеличивается до более 100000 мПа<sup>-</sup>с после подготовки раствора в течение 24 ч, т. е. при низком значении отношения w(П/Cr<sup>3+</sup>) вязкость полимерного геля значительно увеличивается.

Таблица 4. Изменение вязкости полимерного геля со временем (единица измерения мПа·с)

Table 4.Change in viscosity of the polymer gel with time $(mPa \cdot s)$									
Номер эксперимента	Hac/Hour								
Experiment number	0	1	3	6	12	24			
1	16,1	14,1	12,8	14,7	15,4	18,7			
2	14,1	14	12,6	14,6	14,8	27,8			
3	13,15	12	12,2	14,5	14,9	22,2			
4	11,8	11,5	11,7	13,4	14,1	42,6			
5	26,5	26,7	27,5	27,6	49,8	189,5			
6	20,35	20,2	23	21,35	55	>100000			
7	25,1	25,2	26,6	25,2	37,2	53,3			
8	21,8	22,8	23,7	23,3	34,5	61,5			
9	45,3	44,7	44,1	43,7	51,2	200,5			
10	41,5	40,8	41	41,8	47,9	184,5			
11	29,1	28,1	44,5	191,5	42000	>100000			
12	29,5	33,1	43,6	73,6	1050	65000			
13	72,6	72,8	72,9	76,5	80,5	88,5			
14	50,4	52,4	61,8	62,5	70,2	190			
15	46,2	46,3	47,8	66,9	264,9	>100000			
16	37,9	41,9	46,5	22000	>100000	>100000			

Таким образом, когда полимерные растворы при приготовлении имеют щелочную среду за счет соответствующего уменьшения значения отношения w ( $\Pi/Cr3+$ ) при регулировании концентрации полимерного раствора и степени минерализации воды, можно получить полимерную гелевую систему с уникальными характеристиками фильтрации и внутримолекулярным сшиванием молекул. Анализ результатов фильтрационных экспериментов показывает, что для коэффициента сопротивления важно влияние степени изменения каждого фактора, полученного фильтрационным экспериментом, на экстремальное число R:  $w(\Pi/Cr^{3+})$ >массовая концентрация полимерного раствора>w(NaCl).

Оптимальный состав полимерного раствора: массовая концентрация полимерного раствора 1300 мг·л<sup>-1</sup>, w(NaCl) 0,4 %, w(П/Сг<sup>3+</sup>) 4; массовая концентрация полимерного раствора 1600 мг·л<sup>-1</sup>, w(NaCl) 0,6 %, w(П/Сг<sup>3+</sup>) 4. В условиях оптимального состава полимерного раствора коэффициент сопротивления полимерного геля составляет 391,7. Для остаточного коэффициента сопротивления важное значение имеет влияние степени изменения каждого фактора, полученного фильтрационным экспериментом, на экстремальное число R: w(П/Сг<sup>3+</sup>)>w(NaCl)>массовая концентрация полимерного раствора. В условиях оптимального состава полимерного раствора остаточный коэффициент сопротивления полимерного геля составляет 433,3.

Таким образом, в условиях нефтяного пласта оптимальный состав внутримолекулярной сшитой полимерной гелевой системы: массовая концентрация полимерного раствора в пределах 1300...1600 мг·л<sup>-1</sup>, w(NaCl) 0,4...0,6 %, w(П/Сг<sup>3+</sup>) 4...6.

Вязкоэластичность полимерной гелевой системы. По результатам фильтрационных экспериментов были приготовлены растворы полимерного геля, которые имеют хороший эффект гелеобразования и измерена их вязкоэластичность. Сравнения модуля накопления, модуля потери и первого градиента нормальных напряжений соответствующей системы показаны на рис. 5. Из рис. 5 видно, что в условиях одинаковой массовой концентрации полимерного геля модуль накопления G', модуль потерь G" и первый градиент нормальных напряжений  $N_1$  раствора полимерного геля больше, чем для полимерного раствора, и вязкоэластичность повышается со степенью сшивания. Согласно модели Максвелла [23], можно получить:

G'= $\eta \omega^2/(1 + \tau^2 \omega^2)$ , G"= $\eta \omega/(1 + \tau^2 \omega^2)$ , (3) где  $\eta$  – вязкость, мПа·с;  $\omega$  – угловая скорость,

рад/с;  $\tau$  – время релаксации, с. Из формул (3) видно, что, когда частота колебаний (угловая скорость  $\omega$ ) невысокая, вязкоэластичность системы сильно зависит от времени релаксации ( $\tau$ ). В это время для полимерного раствора между полимерными молекулярными цепями нет сильных химических связей, степень растяжения достаточна велика, агрегаты полимерных молекул более гибкие и степень свободы движения сегмента выше, в структуре молекулярной цепи могут происходить большие изменения под действием внешних сил, за счет этого в системе может наблюдаться явление гистерезиса с достаточно большим временем релаксации.

Для системы полимерного геля из-за внутримолекулярного сшивания за счет координационных связей усиливается жесткость агрегатов полимерной молекулы, в главной полимерной цепи трудно произвести большие изменения под действием внешних сил, даже если и происходит деформация, она может быстро восстановиться. Время за-



Рис. 5. Сравнение вязкоэластичности между полимерным раствором и полимерным гелем. 1 – полимерный раствор с массовой концентрацией 1600 Мг/л; 2 – полимерный раствор с массовой концентрацией 2200 Мг/л; 3 – полимерный гель (c=1300 Мг/л, w(NaCl)=0,6; w(П/Cr<sup>3+</sup>)=8); 4 – полимерный гель (c=1600 Mг/л, w (NaCl)=0,4; w (П/Cr<sup>3+</sup>)=8)

Fig. 5. Viscoelasticity comparison between polymer solution and polymer gel. 1 – polymer solution with concentration of 1600 mg/L; 2 – polymer solution with concentration of 1600 mg/L; 3 – crosslinked polymer gel (c=1300mg/L, w (NaCl)=0,6; w ( $\Pi/Cr^{s_+}$ )=8); 4 – crosslinked polymer gel (c=1600mg/L, w (NaCl)=0,4; w ( $\Pi/Cr^{s_+}$ )=8)

держки системы и время релаксации системы являются короткими, поэтому G', G" и N<sub>1</sub> системы полимерного геля значительно больше, чем G', G" и N<sub>1</sub> для полимерного раствора. После того как в полимерном растворе произойдет реакция внутримолекулярного сшивания, с увеличением сшивающего эффекта, усиливается жесткость полимерных молекулярных агрегатов, ослабляется деформируемость, улучшается способность восстанавливать деформацию, сокращается время релаксации и повышается вязкоэластичность. С увеличением частоты колебаний возрастает влияние угловой скорости  $\omega$  и координационные связи с более низкой энергией на полимерной молекулярной цепи в полимерной гелевой системе начинают разрушаться, гибкость агрегатов полимерных молекул возрастает, время задержки системы увеличивается, постепенно приближается к вязкоэластичности полимерных растворов с одинаковой массовой концентрацией, поэтому, когда частота колебаний полимерной системы относительно велика, G', G" и N<sub>1</sub> системы полимерного геля близки к G', G" и N<sub>1</sub> полимерного раствора.

Таблица 5. Результаты измерения размера молекулярного клубка D<sub>h</sub> в полимерных гелях

Table 5.	Results of	measuring	the	molecular	coil	size .	$D_h$ in	poly-
	mer gels							

Массовая концентрация полимерного раствора <i>c</i> , мг·л <sup>-1</sup> Mass concentration of polymer solution, <i>c</i> , mg/L	w(NaCl)/%	$w(\Pi/\mathrm{Cr}^{3+})$	$D_{h},$ HM/nm
1000	0	0	182,5
1000	0,2	4	166,5
1300	0	0	198,6
1300	0,4	4	172,3
1300	0,6	8	170,8
1600	0	0	237,4
1600	0,4	8	205,9

Размер молекулярного клубка *D<sub>h</sub>* в полимерных *гелях*. По результатам экспериментов по гелеобразованию были выбраны полимерные гелевые системы с хорошим эффектом гелеобразования и подготовлены растворы полимерного геля, затем были помещены в термостат (45 °C) на 50 мин, были подготовлены целевые растворы. Размеры полимерного молекулярного клубка  $D_h$  целевых растворов были измерены и проведены сравнительные анализы с размером молекулярного клубка полимера  $D_h$  полимерного раствора с такой же массовой концентрацией. Результаты измерений представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что размер молекулярного клубка полимера в системе полимерного геля меньше, чем размер молекулярного клубка полимера с той же массовой концентрацией полимерного раствора. Это связано с тем, что Na<sup>+</sup> и Cr<sup>3+</sup> в полимерной гелевой системе сжимают электрический двойной слой, изменяют  $\zeta$  потенциал двойного слоя молекулы полимера и блокируют электростатическое отталкивание между карбоксильными анионами на цепях полимерных молекул. Кроме того, внутри одной полимерной молекулы происходят реакции внутримолекулярного сшивания, в результате происходит сжатие полимерных цепей, усиливается эффект молекулярного капсулирования и уменьшается размер полимерных молекулярных клубков. Согласно анализу результатов фильтрационных экспериментов и тестирования вязкоэластичности полимерной гелевой системы, по сравнению с той же массовой концентрацией полимерного раствора межмолекулярная сила между молекулами полимера в системе негелелированного полимерного раствора не изменилась. Добавленный модификатор и сшивающий агент в полимерный раствор увеличил степень минерализации и соленость раствора, уменьшил размер молекулярного клубка полимера, но оказал меньшее влияние на молекулярную структуру полимера, т. е. полимерные молекулярные клубки сохраняют определенную степень гибкости, также увеличивается свободная миграционная способность молекулы полимера через керны, способность задержки через поры уменьшается, а коэффициент

сопротивления и коэффициент остаточного сопротивления снижаются. Однако для полимерных гелевых систем с хорошим эффектом гелеобразования, размер полимерных молекулярных клубков также снижается, но в связи с протеканием реакции внутримолекулярного сшивания в системе, жесткость полимерных молекулярных клубков повышается, способность задержки молекул полимерного геля в керне увеличивается и значительно увеличивается коэффициент сопротивления и коэффициент остаточного сопротивления. Таким образом, полимерная гелевая система, основанная на реакции внутримолекулярного сшивания, не только обладает высокой вязкоэластичностью, но также имеет меньший размер молекулярного клубка полимера, но и более лучшую способность задержки, что способствует достижению эффекта управления потоком в глубокой части керна.

Эффект вытеснения нефти полимерным гелем. После проведения реакции внутримолекулярного сшивания полимерного раствора свойства фильтрации и вязкоэластичность системы значительно улучшаются. Свойства фильтрации и вязкоэластичность соответственно влияют на способность увеличения коэффициента охвата нефти и коэффициента вытеснении нефти из пластов, поэтому теоретически и практически система полимерного геля имеет хороший эффект увеличения добычи нефти. В связи с этим был исследован эффект вытеснения нефти за счет использования системы полимерного геля по сравнению с эффектом вытеснения нефти полимерным раствором с высокой массовой концентрацией. Результаты экспериментов представлены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что при тех же условиях система полимерного геля имеет более лучший эффект интенсификации добычи нефти, чем раствор полимера с высокой массовой концентрацией. Вязкоэластичность полимерного раствора с высокой массовой концентрацией больше, чем вязкоэластичность полимерной гелевой системы, но большая вязкоэластичность полимерного раствора с высокой массовой концентрацией в основном достигается за счет повышения степени сцепления между молекулярными цепями полимера, которое неизбежно приводит к увеличению размера клубка полимерной молекулы и потере давления в входной части керна и в конечном итоге это приводит к уменьшению коэффициента охвата пласта нефти и коэффициента вытеснения нефти из пласта. С одной стороны, по сравнению с концентрированными растворами полимера размер агрегатов полимерных молекул в полимерной гелевой системе меньше, а способность миграции в керне сильнее, что позволяет управлять профилем в глубокой части керна.

С другой стороны, реакция внутримолекулярного сшивания снижает гибкость агрегатов полимерной молекулы, повышает жесткость, ухудшает их деформируемость в процессе прохождения через поры и увеличивает время задержки молекул полимера в слое с высокой проницаемостью. С увеличением давления нагнетания повышается перепад давлений поглощения жидкости между слоями средней и низкой проницаемости и способность управления потоком жидкости возрастает. В результате полимерная гелевая система не только обладает хорошей приемистостью, также повышается давление нагнетания и объем охвата нефти. Кроме того, хорошая вязкоэластичность системы полимерного геля также способствует увеличению коэффициента охвата нефти и коэффициента вытеснения нефти, поэтому конечный коэффициент извлечения нефти за счет использования системы полимерного геля будет выше.

Таблица 6. Результаты экспериментов моделирования процессов вытеснения нефти

			%	Коэффициент извле- чения нефти, % Oil recovery ratio, %			
Содержание эксперимента Content of the experiment	Вязкость, мПа <sup>.</sup> Viscosity, µ, mPa <sup>.</sup> s	$\mathrm{D}_h,\mathrm{H}\mathrm{M}/\mathrm{n}\mathrm{m}$	Hedyrenacumenthocrb, Oil saturation, %	Заводнение Water flooding	Химическое заводнение Chemical flooding	Прирост коэффициента извлечения нефти Increase in oil recovery ratio	
Заводнение 98 % +0,57 $V_{\rm пор}$ полимер+последующее заводнение до обводненно- сти 98 % Water flooding 98 % +0,57 $V_{\rm pore}$ polymer+ subsequent water flooding to water cut 98 %	81,2	324,7	69,9	39,7	53,8	14,1	
Заводнение 98 %+0,57 $V_{\rm пор}$ полимер- ный гель+последующее заводнение до обводненно- сти 98 % Water flooding 98 %+0,57 $V_{\rm pore}$ polymer+ subsequent water flooding to water cut 98 %	31,4	205,9	68,9	40,7	56,1	16,0	

 Table 6.
 Results of modeling experiments of oil displacement

#### Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследований формирования полимерного геля из водного раствора полиакриламида в присутствии ацетата хрома. Установлены оптимальные полимерные гелевые системы с внутримолекулярным сшиванием при регулировании концентрации полимера, степени минерализации воды и соотношения содержания полимера и хрома.

Показано, что полимерная гелевая система по сравнению с системой полимерного раствора с той же концентрацией полимера имеет более высокую вязкоэластичность за счет протекания реакций внутримолекулярного сшивания, и вязкоэластичность полимерного геля повышается от степени сшивания. Также для полученных растворов полимерного геля модуль накопления G', модуль потерь G" и первый градиент нормальных напряжений  $N_{\rm 1}$ значительно больше, чем для полимерных растворов.

Несмотря на то, что концентрированные полимерные растворы имеют высокую вязкоэластичность, их большие размеры агрегата полимерных молекул могут привести к низкой адаптации пласта. В связи с этим полимерная гелевая система на

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Zhang J. Study of crosslinking and transport blocking properties of polymer gel system in porous media // Petroleum geology and recovery efficiency. 2012. V. 19. № 2. P. 54–56.
- Application progress of weak gel systems in oilfield profile control technology / D. Xu, Y. Zheng, S. Zhang, Y. Zhao, W. Li, D. Shen // Chemical industry and engineering progress. 2015. V. 34. № 5. P. 1323–1331.
- Манжай В.Н., Поликарпов А.В., Рождественский Е.А. Применение нефтерастворимых полимеров для повышения нефтеотдачи пластов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 29–35.
- Нажису, Ерофеев В.И., Исследование и применение комплексной технологии заводнения для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 10. – С. 96–100.
- Current development and application of chemical combination flooding technique / Y. Zhu, Q. Hou, G. Jian, D. Ma, Z. Wang // Petroleum exploration and development. - 2013. - V. 40. -№ 1. - P. 90-96.
- Seepage characteristics and mechanism of Cr<sup>3+</sup> cross-linked polymer solution in ultra-high salinity media / J. Liu, X. Lu, G. Li, R. Wang, L. Niu // Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science). 2013. V. 37. № 6. P. 145-152.
- Performance comparison of comb polymer gel and ordinary polymer gel / F. Wang, F. Zhao, J. Hou, Y. Tang, S. Cao, H. Hao // Oilfield Chemistry. - 2015. - V. 23. - № 2. - P. 209-212.
- Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control // Petroleum exploration and development. - 2015. - V. 42. - № 4. - P. 481-487.
- Jia H., Pu W. Research on water control and water shutoff technologies of organic-gel // Journal of southwest petroleum university (Science & Technology Edition). - 2013. - V. 35. -№ 6. - P. 141-150.
- Xiong C., Tang X. Technologies of water shut-off and profile control: an overview // Petroleum exploration and development. – 2007. – V. 34. – № 1. – P. 83–86.
- Effects of surfactant and alkali on the gelation performance of Cr<sup>3+</sup> with HPAM and its action mechanism / J. Liu, X. Lu, Y. Zhang, W. Cao, K. Xie, H. Pan, J. Zhao, G. Li // Acta Petrolei Sinica (petroleum processing section). – 2018. – V. 34. – № 3. – P. 614–622.

основе полиакриламида с добавлением  $Cr^{3+}$  с более низкой массовой концентрацией и структурами, образованными за счет протекания реакций внутримолекулярного сшивания молекул полимера, обладает лучшей способностью управления потоком, хорошей вязкоэластичностью, поэтому их эффект повышения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений будет выше.

- Molecular construction of Al<sup>8+</sup> cross-linked polyacrylamide gel and its identification method / X. Lu, Y. Hu, J. Song, J. Zhao // Acta Petrolei Sinica. – 2005. – V. 260. – № 4. – P. 73–76.
- Wang W., Lu X., Xie X. Evaluation of intramolecular cross-linked polymers // SPE Western regional and pacific section AAPG joint meeting. – Bakersfield, California, USA, 29 March – 4 April, 2008. – P. 1–9.
- Modeling of pre-gel aggregate growth during the gelation of a polyacrylamide-chromium (III) acetate gel system using the theory of branching processes / M. Cheng, C. Wang, C.S. McCool, D.W. Green, G.P. Willhite // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. The Woodlands, Texas, 2-4 February, 2005. P. 1-19.
- Visualization experiments on polymer-weak gel profile control and displacement by NMR technique / Q. Di, J. Zhang, S. Hua, H. Chen, C. Gu // Petroleum exploration and development. – 2017. – V. 44. – № 2. – P. 270–274.
- Vargas-Vasquez S.M., Romero-Zeron L.B. A review of the partly hydrolyzed polyacrylamide Cr (III) acetate polymer gels // Petroleum science and technology. – 2008. – № 4. – P. 481–498.
- Analysis of reservoir applicability of hydrophobically associating polymer / K. Xie, X. Lu, Q. Li, W. Jiang, Q. Yu // SPE Journal. – 2016. – V. 21. – № 1. – P. 1–9.
- 18. Analysis of dynamic imbibition effect of surfactant in micro cracks in reservoir with high temperature and low permeability / K. Xie, X. Lu, H. Pan, D. Han, G. Hu, J. Zhang, B. Zhang, B. Cao // SPE Production & Operations. - 2018. - V. 33. - № 3. - P. 596-606.
- Lu X., Gao Z., Yan W. Experimental study of factors influencing permeability of artificial core // Petroleum Geology – Oilfield Development in Daqing. – 1994. – V. 13. – № 4. – P. 53–55.
- 20. Influence of rock pores on gel-forming of amphion polymer gel / J. Liu, X. Lu, Y. Zhou, S. Hu, B. Xue // Journal of China University of Petroleum. - 2014. - V. 38. - № 2. - P. 171-179.
- Chen T., Zhou X., Tang F. EOR technology of weak gel flooding. - Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. - P. 33-35.
- Kong S., Kong B., Xiao L. Research and application of microgel flooding in Henan Oilfield – Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. – P. 30–33.
- Xu Y. Chemical reaction kinetics. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. – P. 125–130.

Поступила 08.11.2018 г.

## Информация об авторах

*Нажису*, аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Ерофеев В.И.*, доктор технический наук, академик Российской академии естествознания, заслуженный деятель науки РФ, профессор отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Лу Цзиньлун*, магистр ключевой лаборатории Министерства образования по увеличению нефтеотдачи пластов Института нефтегазового дела Северо-восточного нефтяного университета.

Ван Вэй, магистр ключевой лаборатории Министерства образования по увеличению нефтеотдачи пластов Института нефтегазового дела Северо-восточного нефтяного университета. UDC 622.276

# STUDY OF FILTRATION AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER GEL TO IMPROVE OIL RECOVERY

## Narisu<sup>1</sup>,

Narisu33@126.com

Vladimir I. Erofeev<sup>1</sup>, erofeevvi@mail.ru

**Lv Jinlong**<sup>2</sup>, 1461284070 @gg.com

## Wang Wei<sup>2</sup>,

739497456 @qq.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

## <sup>2</sup> Northeast Petroleum University, 199, Razvitiya street, Daqing, 163000, China.

**The relevance.** Polymer flooding is widely used in practice in the development of oil fields. The high-concentration polymer solution has strong viscoelasticity, but with the increase in mass concentration of the polymer, the compatibility problem occurs between polymer molecules aggregate size and reservoir rock pore size during its practical application.  $Cr^{3+}$  polymer gel based on intramolecular cross-linking has a smaller aggregate size and good compatibility with the reservoir, so it is relevant to study the effect of gel formation of  $Cr^{3+}$  polymer gel and its influence factors.

**The main aim** of the research is to study filtration and rheological properties of polyacrylamide-based aqueous gel with chromium acetate to enhance oil recovery.

**Methods:** physical simulation of oil displacement and fluid filtration under reservoir conditions on a filtration unit, determination of viscosity of cross-linked polymer gel using the Brookfield DV-II viscometer, measuring the size of the molecular coil Dh in a Brookhaven BI-200SM light scattering system (Brookhaven Instruments Cop., USA), determination of viscoelasticity using the Harke10 rheometer. **Results.** Regulating the concentration of polymer, water solution salinity and the ratio of the polymer content and chromium (w  $(\Pi/Cr^{a+}))$ , one can obtain the  $Cr^{a+}$  polymer gel system based on intramolecular cross-linking with a smaller molecular aggregate and higher resistance confidence. After the reaction of intramolecular cross-linking of the polymer solution, on the one hand the viscoelasticity of the system is significantly improved and the oil displacement coefficient increased. On the other hand, the intramolecular crosslinking parseng through the pores, and enhance the retention ability in the high permeability layer.  $Cr^{a+}$  polymer gel system nolecule aggregates, increases their rigidity, weaken their deformability in the process of passing through the pores, and enhance the retention ability in the high permeability layer.  $Cr^{a+}$  polymer gel system not only has good injectability, it can also gradually reach a higher injection pressure, so it enlarges sweep volume effectively. In total, it is shown that the oil recovery coefficient of the polymer gel system is higher than the polymer solution.

#### Key words:

Polymer gel, intramolecular cross-linking of polymer molecules, viscoelasticity, molecular coil size, resistance coefficient, enhanced oil recovery.

### REFERENCES

- 1. Zhang J., Study of crosslinking and transport blocking properties of polymer gel system in porous media. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 54–56.
- Xu D., Zheng Y., Zhang S., Zhao Y., Li W., Shen D., Application progress of weak gel systems in oilfield profile control technology. *Chemical industry and engineering progress*, 2015, vol. 34, no. 5, pp. 1323-1331.
- Manzhay V.N., Polikarpov A.V., Rozhdestvensky E.A. Application of oil-soluble polymers for increasing petroleum oil refining. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 29–35. In Rus.
- Narisu, Erofeev V.I. Investigation and application of integrated technology of the plant for improvement of petroleum oil refining. Advances in current natural sciences, 2017, no. 10, pp. 96-100. In Rus.
- Zhu Y., Hou Q., Jian G., Ma D. Wang Z., Current development and application of chemical combination flooding technique. *Petroleum exploration and development*, 2013, vol. 40, no. 1, pp. 90–96.

- Liu J., Lu X., Li G., Niu L. Seepage characteristics and mechanism of Cr<sup>3+</sup> cross-linked polymer solution in ultra-high salinity media. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, vol. 37, no. 6, pp. 145–152.
- Wang F., Zhao F., Hou J., Tang Y., Cao S., Hao H., Performance comparison of comb polymer gel and ordinary polymer gel. *Oilfield Chemistry*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 209–212.
- 8. Bai B., Zhou J., Yin M. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. *Petroleum exploration and development*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 481–487.
- Jia H., Pu W. Research on water control and water shutoff technologies of organic-gel. Journal of southwest petroleum university (Science & Technology Edition), 2013, vol. 35, no. 6, pp. 141–150.
- Xiong C., Tang X. Technologies of water shut-off and profile control: an overview. *Petroleum exploration and development*, 2007, vol. 34, no. 1, pp. 83–86.
- 11. Liu J., Lu X., Zhang Y., Cao W., Xie K., Pan H., Zhao J., Li G. Effects of surfactant and alkali on the gelation performance of Cr<sup>3+</sup> with HPAM and its action mechanism. Acta Petrolei Sinica (petroleum processing section), 2018, vol. 34, no. 3, pp. 614–622.

- Lu X., Hu Y., Song J., Zhao J. Molecular construction of Al<sup>3+</sup> cross-linked polyacrylamide gel and its identification method. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, vol. 260, no. 4, pp. 73–76.
- Wang W., Lu X., Xie X. Evaluation of intramolecular cross-linked polymers. SPE Western regional and pacific section AAPG joint meeting. Bakersfield, California, USA, 29 March – 4 April, 2008. pp. 1–9.
- 14. Cheng M., Wang C., McCool C.S., Green D.W., Willhite G.P. Modeling of pre-gel aggregate growth during the gelation of a polyacrylamide-chromium (III) acetate gel system using the theory of branching processes. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. Woodlands, Texas, 2-4 February, 2005. pp. 1–19.
- Di Q., Zhang J., Hua S., Chen H., Gu C. Visualization experiments on polymer-weak gel profile control and displacement by NMR technique. *Petroleum exploration and development*, 2017, vol. 44, no. 2, pp. 270–274.
- Vargas-Vasquez S.M., Romero-Zeron L.B. A Review of the Partly Hydrolyzed Polyacrylamide Cr (III) Acetate Polymer Gels. Romero-Zeron. *Petroleum Science and Technology*, 2008, no. 4, pp. 481-498.
- Xie K, Lu X, Li Q, Jiang W, Yu Q. Analysis of Reservoir Applicability of Hydrophobically Associating Polymer. SPE Journal, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 1–9.

- Xie K., Lu X., Pan H., Han D., Hu G., Zhang J., Zhang B., Cao B. Analysis of dynamic imbibition effect of surfactant in micro cracks in reservoir with high temperature and low permeability. *SPE Production & Operations*, 2018, vol. 33. no. 3, pp. 596–606.
- Lu X., Gao Z., Yan W. Experimental study of factors influencing permeability of artificial core. *Petroleum Geology - Oilfield Deve*lopment in Daqing, 1994, vol. 13, no. 4, pp. 53-55.
- Liu J., Lu X., Zhou Y., Hu S., Xue B. Influence of rock pores on gel-forming of amphion polymer gel. *Journal of China University* of Petroleum, 2014, vol. 38. no. 2. pp. 171–179.
- Chen T., Zhou X., Tang F. EOR technology of weak gel flooding. Beijing, Petroleum Industry Press, 2006. pp. 33-35.
- Kong S., Kong B., Xiao L. Research and application of microgel flooding in Henan Oilfield. Beijing, Petroleum Industry Press, 2004. pp. 30-33.
- Xu Y. Chemical reaction kinetics. Beijing, Chemical Industry Press, 2005. pp. 125–130.

Received: 8 November 2018.

#### Information about the authors

Narisu, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Erofeev, Dr. Sc., Academician of RANS, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lv Jinlong, graduate student, Northeast Petroleum University.

Wang Wei, graduate student, Northeast Petroleum University.

УДК 621.313.282.2: 621.316.79

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АКТИВАТОРА ПО ГРАНИЧНЫМ ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫМ ЧАСТОТАМ

Гаврилин Алексей Николаевич<sup>1</sup>,

tom-gawral@list.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>1</sup>,

kladiev@tpu.ru

Глазырин Александр Савельевич<sup>1</sup>,

asglazyrin@tpu.ru

Боловин Евгений Владимирович<sup>1</sup>,

bolovinev@mail.ru

## Полищук Владимир Иосифович<sup>2</sup>,

polischuk vi@mail.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Актуальность исследования обусловлена тем, что вибрационные электромагнитные активаторы являются эффективными устройствами для перемешивания суспензий, эмульсий, приготовления буровых растворов, разжижения высоковязких нефтепродуктов. Якорь специальной конструкции представляет собой гидравлический вентиль. При вибрации якоря на частотах, близких к резонансной частоте, в обрабатываемой жидкой среде создаются глубоко затопленные струи, которые при относительно невысоком энергопотреблении вибрационного электромагнитного активатора обеспечивают высокую эффективность перемешивания жидкой среды и снижение вязкости нефтепродуктов на продолжительном интервале времени. Резонансная частота механической системы зависит от жесткости пружины, массы якоря-активатора, присоединенной массы колеблющейся с якорем жидкой среды и от коэффициента вязкого трения, определяющего отведение энергии из колеблющейся механической системы. При изменении реологических свойств обрабатываемой жидкой среды изменяются как параметры механической колебательной системы, так и вид амплитудно-частотных характеристик вибрационного электромагнитного активатора. Способ организации мониторинга изменения реологических свойств обрабатываемой вибрационным электромагнитным активатором жидкой среды на основе прямых измерений, например с помощью вискозиметров, пригоден только для лабораторных условий и не годится для промышленного внедрения. По мнению авторов, более перспективным является подход, основанный на решении обратной математической задачи, когда, анализируя вид амплитудно-частотных характеристик вибрационного электромагнитного активатора, в частности граничные околорезонансные частоты, можно получить достоверные оценки параметров механической колебательной системы вибрационного электромагнитного активатора. Эти оценки удобно применять для организации как косвенного мониторинга изменения реологических свойств обрабатываемой жидкости в процессе работы вибрационного электромагнитного активатора, так и для усовершенствования структуры системы автоматического управления вибрационным электромагнитным активатором.

**Цель** исследования заключается в разработке метода идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора на основе анализа граничных околорезонансных частот и определении границ применимости метода в сильно нагруженных колебательных механических системах.

**Методы:** обыкновенные дифференциальные уравнения, преобразование Лапласа, передаточные функции, амплитудно-частотные характеристики, алгебраические уравнения.

**Результаты.** Получены аналитические выражения, связывающие граничные околорезонансные частоты с параметрами механической колебательной системы, на основе которых составляются системы алгебраических уравнений. Показаны границы применимости метода в сильно нагруженных колебательных механических системах.

#### Ключевые слова:

Вибрационный электромагнитный активатор, механическая система, параметры, идентификация, резонанс, амплитудно-частотная характеристика, граничные околорезонансные частоты.

## Введение

Электромагнитные двигатели с возвратно-поступательным движением [1-3] находят применение в технологиях, связанных с сейсморазведкой [4-9], приготовлением буровых растворов [10, 11], подготовкой высоковязких нефтепродуктов к транспортировке [12-17]. Работающие в околорезонансном режиме вибрационные электромагнитные активаторы в качестве разжижителей высоковязких нефтепродуктов имеют ряд преимуществ [18] в массогабаритных показателях и энергопотреблении по сравнению с винтовыми устройствами размыва донных отложений, что позволяет более удобно встраивать вибрационные электромагнитные активаторы (ВЭМА) в технологический процесс [19, 20]. Для эффективного управления ВЭМА требуется автоматическая подстройка [21, 22] на резонансную частоту и предельный безударный режим работы [23], что можно обеспечить на основе непрерывного косвенного мониторинга изменения реологических свойств обрабатываемой жидкости, которые непосредственно связаны с параметрами механической колебательной системы.

Предложенный способ идентификации параметров механической системы вибровозбудителя, работающего в околорезонансном диапазоне частот, позволяет определить диссипативные параметры колебательной системы путем анализа вида амплитудно-частотных характеристик. Полученные оценки позволяют косвенно оценить вязкость обрабатываемой жидкости.

В представленной работе проведено аналитическое исследование частотных характеристик ВЭМА в рабочем диапазоне частот, при условии, что удары якоря-активатора о стенки корпуса отсутствуют, т. е. наблюдается режим безударной работы. Для настройки на резонансную частоту могут использоваться датчики ускорения, скорости или положения, поэтому было бы логично проанализировать частотные характеристики механического канала ВЭМА для ускорения, скорости и отклонения якоря от положения равновесия (виброперемещения). Исследовалась механическая система ВЭМА с «глухим якорем», результаты же в основном применимы для электромеханического преобразователя с виброструйным якорем-активатором. Показано влияние непостоянства присоединённой колеблющейся массы и ослабления пружины на частотные характеристики.

## Математическая модель для описания взаимосвязи между параметрами механического колебательного контура и граничными околорезонанстными частотами

Нижеприведенные выкладки по описанию математической модели, позволяющей находить взаимосвязи между параметрами механического колебательного контура ВЭМА и граничными околорезонанстными частотами, составлялись при условии ее линеаризации и стационарности параметров в течении всего промежутка времени измерения и построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Вопрос о погрешности линеаризации математической модели механической колебательной системы ВЭМА рассмотрен в [19], где было отмечено, что на основании сопоставления полученных на имитационной модели и экспериментальных АЧХ ВЭМА погрешность настройки на резонансную частоту с использованием такой линеаризованной модели не превышает 6 %, что является допустимым. Для заявленных целей, а именно для мониторинга изменения реологических свойств обрабатываемой жидкой среды и самонастройки автоматической системы управления ВЭМА, такой подход является оправданным.

В статье все физические величины приведены в единицах СИ по умолчанию, кроме оговоренных особо.

Запишем уравнение равновесия для механического контура ВЭМА:

$$F_{_{\rm BM}}(t) = m_{_{\Sigma}} \frac{d^2}{dt^2} x(t) + R_{_{\rm Mex}} \frac{d}{dt} x(t) + x(t)k_{_{\rm Hp}}, \quad (1)$$

где  $F_{_{3M}}(t)$  – сила, стягивающая магнитный зазор, является вынуждающей; x(t) – отклонение активатора от положения равновесия;  $R_{_{\rm MEX}}$ =100 кг/с – коэффициент вязкого трения;  $k_{_{\rm TP}}$ =1,85·10<sup>5</sup> H/м – жёсткость пружины;  $m_{_{\Sigma}}$ =1,157 кг – суммарная колеблющаяся масса  $m_{_{\Sigma}}$ = $m_{_{\rm a}}$ + $m_{_{\rm присоед}}$ , состоит из  $m_{_{\rm a}}$ =0,49 кг – массы якоря-активатора и  $m_{_{\rm присоед}}$  – присоединённой колеблющейся массы жидкости.

Согласно принятому допущению о линейности и стационарности математической модели механического контура ВЭМА (1), будем считать, что суммарная колеблющаяся масса, жёсткость пружины и коэффициент вязкого трения не зависят от x(t) и его

производных  $\frac{dx(t)}{dt}$  и  $\frac{d^2x(t)}{dt^2}$ , а также от времени,

следовательно, правомерно применять к уравнению (1) любые временные и частотные преобразования.

Применив преобразование Лапласа, получим:

$$\begin{split} F_{_{\partial M}}(p) &= m_{_{\Sigma}}x(p)p^{2} + R_{_{\rm Mex}}x(p)p + k_{_{\rm TP}}x(p);\\ F_{_{\partial M}}(p) &= x(p)(m_{_{\Sigma}}p^{2} + R_{_{\rm Mex}}p + k_{_{\rm TP}});\\ F_{_{\partial M}}(p) &= m_{_{\Sigma}}x(p)\bigg(p^{2} + \frac{R_{_{\rm Mex}}}{m_{_{\Sigma}}}p + \frac{k_{_{\rm TP}}}{m_{_{\Sigma}}}\bigg), \end{split}$$

где *р* – оператор Лапласа.

Для адекватной оценки вибрационных воздействий на систему измеряются параметры вибрации (форма сигнала, спектр). Оценка обычно производится на соответствующих частотах: 10–100 Гц по величине размаха виброперемещений, 100–1000 Гц по величине виброскорости, свыше 1000 Гц по значению виброускорения [24, 25]. Как правило, в качестве датчиков используются акселерометры, сигнал от которых посредством процедуры интегрирования превращается в необходимые физические величины виброскорости или виброперемещения. Поэтому в данной статье будут рассмотрены передаточные функции и АЧХ для каждого из указанных видов сигналов.

В случае если для измерения параметров вибрации используется сигнал от датчика виброперемещения, передаточная функция механического контура ВЭМА – отношение изображений по Лапласу величины отклонения активатора от положения равновесия к вызвавшей это отклонение электромагнитной силе

$$W_{\text{Mex}}(p) = \frac{x(p)}{F_{\text{SM}}(p)} = \frac{1}{(m_{\Sigma}p^2 + R_{\text{Mex}}p + k_{\text{III}})}.$$

Амплитуда x(p) пропорциональна произведению  $F_{\text{BM}}(p)$  на  $W_{\text{Mex}}(p)$ 

$$x(p) = \frac{F_{\text{\tiny BM}}(p)}{(m_{\Sigma}p^2 + R_{\text{mex}}p + k_{\text{mp}})} = F_{\text{\tiny BM}}(p)W_{\text{mex}}(p).$$

Сделаем подстановку  $p=j\omega$ , где  $j=\sqrt{-1}$  – мнимая единица;  $\omega=2\pi f$  – круговая частота; f – циклическая частота, получим  $W_{\text{Mex}}(j\omega)$  и представим её вещественной  $P(\omega)$  и мнимой  $Q(\omega)$  составляющими

$$W_{\text{Mex}}(j\omega) = \frac{1}{(m_{\Sigma}j^{2}\omega^{2} + R_{\text{Mex}}j\omega + k_{\text{mp}})};$$
  

$$W_{\text{Mex}}(j\omega) = \frac{1}{(-m_{\Sigma}\omega^{2} + R_{\text{Mex}}j\omega + k_{\text{mp}})} = \frac{1}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\text{Mex}}j\omega};$$
  

$$W_{\text{Mex}}(j\omega) = \frac{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega}{[(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega]} \times [(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega]^{-1}.$$

В итоге после выполнения стандартной операции домножения на комплексно-сопряженную компоненту получим механическую комплексную частотную характеристику:

$$W_{\text{Mex}}(j\omega) = \frac{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^2) - R_{\text{Mex}}j\omega}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\text{Mex}}^2\omega^2}$$

Механическая вещественная частотная характеристика

$$P(\omega) = \frac{k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2}{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\rm Mex}^2\omega^2}.$$

Механическая мнимая частотная характеристика

$$Q(\omega) = \frac{-R_{\text{mex}}\omega}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\text{mex}}^2\omega^2}$$

Механическая амплитудно-частотная характеристика

$$A(\omega) = |W_{\text{Mex}}(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^{2} + Q(\omega)^{2}} = \frac{\sqrt{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + (-R_{\text{Mex}}\omega)^{2}}}{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{Mex}}^{2}\omega^{2}};$$
  
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{k_{\text{np}}^{2} - 2k_{\text{np}}m_{\Sigma}\omega^{2} + m_{\Sigma}^{2}\omega^{4} + R_{\text{Mex}}^{2}\omega^{2}}}.$$

При  $\omega \rightarrow 0$  амплитуда виброперемещения стремится к пределу

$$\lim_{\omega \to 0} A(\omega) = \frac{1}{k_{\rm mp}}.$$

Приравняв числитель производной механической амплитудно-частотной характеристики по частоте

$$\frac{dA(\omega)}{d\omega} = \frac{-1(-4k_{\rm np}m_{\Sigma}\omega + 4m_{\Sigma}^2\omega^3 + 2R_{\rm Mex}^2\omega)}{2(k_{\rm np}^2 - 2k_{\rm np}m_{\Sigma}\omega^2 + m_{\Sigma}^2\omega^4 + R_{\rm Mex}^2\omega^2)^{\frac{3}{2}}}$$

к нулю

$$-4k_{\rm mp}m_{\Sigma}\omega+4m_{\Sigma}^2\omega^3+2R_{\rm mex}^2\omega=0,$$

получим уравнение, решив которое, найдём три корня – два побочных

$$ω_{01} = 0$$
 μ  $ω_{02} = -\sqrt{\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^2}$ 

и один основной корень, который является частотой свободных колебаний или резонансной частотой механического контура ВЭМА

$$\omega_{0} = \sqrt{\frac{k_{\rm mp}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}}$$

Граничная величина коэффициента вязкого трения  $R_{\text{мех гр}} = 2\sqrt{k_{\text{пр}}m_{\Sigma}}$ .

Вид семейств АЧХ механического контура ВЭМА при варьировании параметров представлен на рис. 1.

При стремлении вынуждающей частоты к частоте свободных колебаний механического контура амплитуда виброперемещения стремится к максимуму  $A_{\max}$ , величина которого зависит от параметров механического контура

$$A_{\max} = \lim_{\omega \to \omega_0} A(\omega) = \left[ \left( k_{\pi p} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\pi p}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\max}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) \right)^2 + \left| + R_{\max}^2 \left( \frac{k_{\pi p}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\max}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) \right]^2 + \left| - \frac{1}{2} \right]^2 \right]$$

В работе [26] граничные околорезонансные частоты механического контура ВЭМА было предложено описывать стандартным способом, принятым в теории фильтров [27]. Этот подход заключался в том, что граничные околорезонасные частоты находились из решения нелинейного алгебраического уравнения [28–30], которое составлялось с учетом того, что амплитуда виброперемещения  $A(\omega)$  на граничных околорезонансных частотах уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз  $A_{\max} = A(\omega) = A(\omega)$ , где  $\omega_{\min_1} - \omega \rightarrow \omega_{m_{m_1}}$ 

нижняя граничная частота полосы пропускания механической амплитудно-частотной характеристики;  $\omega_{\rm nn_2}$  – верхняя граничная частота полосы пропускания механической амплитудно-частотной характеристики.

Такой подход хорошо себя зарекомендовал и апробирован на основе экспериментальных данных в слабодемфированных колебательных механических системах [19, 20], для которых справед-

ливо неравенство 
$$\frac{A(\omega_0)}{\sqrt{2}} > A(0)$$
. Но идею о возмож-

ности нахождения параметров механической колебательной системе по граничным околорезонансным частотам  $\omega_{m1}$  и  $\omega_{m2}$  можно распространить



и на механические системы с большей степенью демпфирования. Для этого амплитуда виброперемещения  $A(\omega)$  на граничных околорезонансных частотах будет определяться на основе следующего нелинейного алгебраического уравнения

$$\frac{A(\omega_0) - A(0)}{2} = A(\omega) = A(\omega).$$
(2)

Для нахождения этих частот с учётом (2) составим равенство

$$\frac{1}{\sqrt{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\rm Mex}^{2}\omega^{2}}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{k_{\rm np}} + \left[ \left( k_{\rm np} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right)^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{1}{2} + \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{2} + \left[ \frac{R_{\rm Mex}^{2} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \frac{R_{\rm Mex}$$



- Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики ВЭМА по виброперемещения при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины; в) суммарной колеблющейся массы
- Fig. 1. Frequency response of vibration electromagnetic activator (VEMA) by vibration displacement with varying parameters: a) viscous friction coefficient; b) spring stiffness c) total oscillating mass

Обозначив правую часть вышеприведенного равенства как

$$aa = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{k_{\rm np}} + \left[ \left( k_{\rm np} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) \right)^2 + \left| + R_{\rm Mex}^2 \left( \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) - 1 \right]^2 \right\},$$

получим уравнение четвёртого порядка

$$\frac{1}{\sqrt{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\rm Mex}^2\omega^2}} - aa = 0,$$
 (3)

решив которое, найдём четыре корня.

Уравнение (3) имеет два корня: положительный и отрицательный. Отрицательный корень отбрасываем. В итоге, решив уравнение (3), получим четыре корня – два положительных и два отрицательных. Меньший из положительных корней уравнения (3) является нижней граничной частотой полосы пропускания механической амплитудночастотной характеристики (рис. 2, 3) а больший из положительных корней уравнения (3) является верхней граничной частотой полосы пропускания механической амплитудно-частотной характеристики (рис. 4, 5)



Рис. 2. Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины

Fig. 2. Dependence of the lower limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration displacement on the viscous friction coefficient with varying parameters: a) total oscillating mass; b) spring stiffness



Рис. 3. Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

Fig. 3. Dependence of the lower limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration displacement on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness



Рис. 4. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины

Fig. 4. Dependence of the higher limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration displacement on the viscous friction coefficient with varying parameters: a) total oscillating mass; b) spring stiffness



Рис. 5. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины.

Fig. 5. Dependence of the higher limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration displacement on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness

Получены зависимости граничных частот полосы пропускания механической амплитудно-частотной характеристики от суммарной колеблющейся массы и коэффициента вязкого трения. Зная эти граничные частоты, можно решить систему нелинейных уравнений (4) и (5) и определить действующие значения присоединённой колеблющейся массы и коэффициент вязкого трения.

Имея частоты, ограничивающие полосу пропускания, определяемые по (4) и (5), можно вывести выражение для ширины полосы пропускания, которая, в свою очередь, тоже зависит от суммарной колеблющейся массы и коэффициента вязкого трения  $\Delta \omega_{nn} = \omega_{nn_2} - \omega_{nn_1}$ . Соответствующие аналитические выражения из-за ограниченности объема статьи здесь не приводятся, но их можно вывести с использованием выражений (4) и (5).

Ширина полосы пропускания прямо пропорциональна коэффициенту вязкого трения, в то же время обратно пропорциональна суммарной колеблющейся массе при больших массах и прямо пропорциональна при малых массах (рис. 6, 7).

В случае если для измерения параметров вибрации используется сигнал от датчика виброскорости, передаточная функция механического контура по скорости – отношение величины виброскоро-



**Рис. 6.** Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от козффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины





Рис. 7. Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброперемещению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины.

Fig. 7. Dependence of the bandwidth of the VEMA frequency response by vibration displacement on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness

сти к приложенной к механическому контуру электромагнитной силе

$$W_V(p) = \frac{V(p)}{F_{_{\Theta M}}(p)} = \frac{p}{m_{\Sigma}p^2 + R_{_{Mex}}p + k_{_{IIIP}}}.$$

Амплитуда виброскорости V(p) пропорциональна произведению  $F_{\mathfrak{M}}(p)$  на  $W_{\mathfrak{V}}(p)$ 

$$V(p) = \frac{F_{\text{PM}}(p)p}{m_{\Sigma}p^2 + R_{\text{Mex}}p + k_{\text{IIP}}} = F_{\text{PM}}(p)W_V(p).$$

После подстановки  $p=j\omega$  получим  $W_v(j\omega)$  и представим её составляющими  $P_v(\omega)$  и  $Q_v(\omega)$ 

$$\begin{split} W_{V}(j\omega) &= \frac{j\omega}{m_{\Sigma}(j\omega)^{2} + R_{\text{Mex}}j\omega + k_{\text{mp}}} = \\ &= \frac{j\omega}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\text{Mex}}j\omega}; \\ W_{V}(j\omega) &= \frac{j\omega[(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega]}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\text{Mex}}j\omega} \times \\ &\times [(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega]^{-1}; \\ W_{V}(j\omega) &= \frac{j\omega[(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) - R_{\text{Mex}}j\omega]}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{Mex}}^{2}\omega^{2}}. \end{split}$$

Скоростная комплексно-частотная характеристика

$$W_{V}(j\omega) = \frac{R_{Mex}\omega^{2} + j\omega(k_{mp} - m_{\Sigma}\omega^{2})}{(k_{mp} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{Mex}^{2}\omega^{2}};$$
  
$$W_{V}(j\omega) = \frac{R_{Mex}\omega^{2}}{(k_{mp} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + RR_{Mex}^{2}\omega^{2}} + \frac{j\omega(k_{mp} - m_{\Sigma}\omega^{2})}{(k_{mp} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{Mex}^{2}\omega^{2}}.$$

Скоростная вещественная частотная характеристика

$$P_V(\omega) = \frac{R_{\text{mex}}\omega^2}{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\text{mex}}^2\omega^2}.$$

Скоростная мнимая частотная характеристика

$$Q_{V}(\omega) = \frac{\omega(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^{2})}{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\rm Mex}^{2}\omega^{2}}$$

Скоростная амплитудно-частотная характеристика

$$\begin{split} A_{V}(\omega) &= \left| W_{V}(j\omega) \right| = \sqrt{P_{V}(\omega)^{2} + Q_{V}(\omega)^{2}} = \\ &= \frac{\sqrt{(R_{\text{mex}}\omega^{2})^{2} + [\omega(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})]^{2}}}{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{mex}}^{2}\omega^{2}}; \\ A_{V}(\omega) &= \frac{(R_{\text{mex}}^{2}\omega^{4} + \omega^{2}k_{\text{np}}^{2} - 2\omega^{4}k_{\text{np}}m_{\Sigma} + \omega^{6}m_{\Sigma}^{2})^{\frac{1}{2}}}{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{mex}}^{2}\omega^{2}}. \end{split}$$

При стремлении вынуждающей частоты к частоте свободных колебаний механического контура амплитуда виброскорости аналогично стремится к максимуму, величина которого зависит от параметров механического контура (рис. 8)

$$A_{V}(\omega_{0}) = A_{V}(\omega) = A_{V}(\omega) = A_{V}(\omega);$$
  

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} \left(\frac{R_{\rm mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}};$$
  

$$A_{V}(\omega_{0}) = \left\{ \left[ k_{\rm np} - m_{\Sigma} \left(\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right) \right]^{2} + \frac{R_{\rm Mex}^{2}}{R_{\rm Mex}} \left[\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right]^{2} \right]^{-1} \times \left\{ R_{\rm Mex}^{2} \left[ \frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right]^{2} + \left[\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right]^{2} \right\} k_{\rm np}^{2} - \frac{2}{2} \left[\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right]^{2} k_{\rm np} m_{\Sigma} + \left[\frac{k_{\rm np}}{m_{\Sigma}} - \left(\frac{R_{\rm Mex}}{2m_{\Sigma}}\right)^{2}\right]^{3} m_{\Sigma}^{2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Амплитуда виброскорости  $A_v(\omega)$  на граничных околорезонансных частотах будет определяться на основе следующего нелинейного алгебраического уравнения

$$\frac{A_{V}(\omega_{0}) - A_{V}(0)}{2} = A_{V}(\omega) = A(\omega) = A(\omega).$$
(6)

Исходя из (6), составим равенство

$$\begin{split} \frac{(R_{\text{mex}}^2 \omega^4 + \omega^2 k_{\text{np}}^2 - 2\omega^4 k_{\text{np}} m_{\Sigma} + \omega^6 m_{\Sigma}^2)^{\frac{1}{2}}}{(k_{\text{np}} - m_{\Sigma} \dot{u}^2)^2 + R_{\text{mex}}^2 \dot{u}^2} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\left\{ \left[ k_{\text{np}} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) \right]^2 + \right\}} \times \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\left\{ \left[ k_{\text{np}} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right) \right]^2 + \right\}} \times \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\left\{ \left[ k_{\text{np}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right]^2 + \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right)^2 + \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right)^2 \right\} \times \\ &= 2 \left[ \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right]^2 k_{\text{np}} m_{\Sigma} + \left[ \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^2 \right]^3 m_{\Sigma}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{split}$$

а после преобразования получим уравнение

$$(R_{\text{Mex}}^{2}\omega^{4} + \omega^{2}k_{\text{np}}^{2} - 2\omega^{4}k_{\text{np}}m_{\Sigma} + \omega^{6}m_{\Sigma}^{2})^{\frac{1}{2}} - -[(k_{\text{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{Mex}}^{2}\omega^{2}] \times \\ \times \frac{1}{2} \frac{1}{\left[ \left[ k_{\text{np}} - m_{\Sigma} \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ + R_{\text{Mex}}^{2} \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right) \right]^{2} + \left[ + R_{\text{Mex}}^{2} \left( \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right)^{2} + \left[ \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right] k_{\text{np}}^{2} - 2 \left[ \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{2} k_{\text{np}}m_{\Sigma} + \left[ \frac{k_{\text{np}}}{m_{\Sigma}} - \left( \frac{R_{\text{Mex}}}{2m_{\Sigma}} \right)^{2} \right]^{3} m_{\Sigma}^{2} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.$$

$$(7)$$

Получено уравнение восьмого порядка, решив которое найдём восемь корней. Произведя процедуру отбора корней уравнения (7), получим два искомых корня уравнения. Меньшим из корней является нижняя граничная частота полосы пропускания скоростной амплитудно-частотной характеристики (рис. 9, 10)





- Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики ВЭМА по виброскорости при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины; в) суммарной колеблющейся массы
- Fig. 8. Frequency response of VEMA by vibration velocity with varying parameters: a) viscous friction coefficient; b) spring stiffness; c) total oscillating mass



**Рис. 9.** Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины.





Рис. 10. Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

Fig. 10. Dependence of the lower limiting frequency of the VEMA frequency response of by vibration velocity on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness



Рис. 11. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины

Fig. 11. Dependence of the higher limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration velocity on the viscous friction coefficient with varying parameters: a) total oscillating mass; b) spring stiffness

$$\omega_{V_{nm_{1}}} = \begin{cases} \left[ \frac{48m_{\Sigma}^{3}k_{np}^{3}R_{mex} + 16m_{\Sigma}^{2}k_{np}^{2}R_{mex}^{3}}{m_{\Sigma}^{4}(R_{mex}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{np})^{2}} + \right]^{\frac{1}{2}} \\ + \frac{-10m_{\Sigma}k_{np}R_{mex}^{5} + R_{mex}^{7}}{m_{\Sigma}^{4}(R_{mex}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{np})^{2}} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \\ + \frac{R_{mex}^{4} - 4m_{\Sigma}^{2}k_{np}^{2} - 5m_{\Sigma}k_{np}R_{mex}^{2}}{m_{\Sigma}^{2}(R_{mex}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{np})} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

а большим из корней является верхняя граничная частота полосы пропускания скоростной амплитудно-частотной характеристики (рис. 11, 12)

$$\omega_{V_{-}\mathrm{nn}_{-2}} = \left\{ - \left[ \frac{48m_{\Sigma}^{3}k_{\mathrm{np}}^{3}R_{\mathrm{mex}} + 16m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2}R_{\mathrm{mex}}^{3}}{m_{\Sigma}^{4}(R_{\mathrm{mex}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}})^{2}} + \right]^{\frac{1}{2}} - \left\{ -\frac{10m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{mex}}^{5} + R_{\mathrm{mex}}^{7}}{m_{\Sigma}^{4}(R_{\mathrm{mex}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}})^{2}} - \frac{R_{\mathrm{mex}}^{4} - 4m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 5m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{mex}}^{2}}{m_{\Sigma}^{2}(R_{\mathrm{mex}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}})} \right]^{\frac{1}{2}} - \left\{ -\frac{R_{\mathrm{mex}}^{4} - 4m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 5m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{mex}}^{2}}{m_{\Sigma}^{2}(R_{\mathrm{mex}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}})} \right\}^{\frac{1}{2}} - \left\{ -\frac{R_{\mathrm{mex}}^{4} - 4m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 5m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{mex}}^{2}}{m_{\Sigma}^{2}(R_{\mathrm{mex}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}})} \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}$$

Имея частоты, ограничивающие полосу пропускания, выведем выражение для ширины полосы пропускания скоростной амплитудно-частотной характеристики (рис. 12, 13)



Рис. 12. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины.

Fig. 12. Dependence of the higher limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration velocity on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness



Рис. 13. Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины

Fig. 13. Dependence of the bandwidth of the VEMA frequency response by vibration velocity on the viscous friction coefficient with varying parameters: a) total oscillating mass; b) spring stiffness

$$\Delta \omega_{V_{\rm IIII}} = \omega_{V_{\rm IIII}_{21}} - \omega_{V_{\rm IIII}_{11}}$$

В случае если для измерения параметров вибрации используется сигнал от датчика виброскорости, передаточная функция механического контура по ускорению – отношение величины виброускорения к приложенной к механическому контуру электромагнитной силе

$$W_{a}(p) = \frac{a(p)}{F_{_{\mathfrak{P}M}}(p)} = \frac{p^{2}}{(m_{_{\Sigma}}p^{2} + R_{_{\mathrm{Mex}}}p + k_{_{\mathrm{TP}}})}.$$

$$a(p) = \frac{F_{\text{\tiny BM}}(p)p^2}{(m_{\Sigma}p^2 + R_{\text{mex}}p + k_{\text{mp}})} = F_{\text{\tiny BM}}(p)W_{\text{a}}(p)$$

После подстановки  $p=j\omega$  получим  $W_a(j\omega)$  и представим её составляющими  $P_a(\omega)$  и  $Q_a(\omega)$ 

$$\begin{split} W_{\mathrm{a}}(j\omega) &= \frac{(j\omega)^{2}}{(m_{\Sigma}(j\omega)^{2} + R_{\mathrm{Mex}}j\omega + k_{\mathrm{np}})} = \\ &= \frac{-\omega^{2}}{(k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\mathrm{Mex}}j\omega}; \\ W_{\mathrm{a}}(j\omega) &= \frac{-\omega^{2}[(k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\mathrm{Mex}}j\omega]}{(k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\mathrm{Mex}}j\omega} \times \\ &\times [(k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\mathrm{Mex}}j\omega]^{-1}; \\ W_{\mathrm{a}}(j\omega) &= \frac{-\omega^{2}((k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2}) + R_{\mathrm{Mex}}j\omega)}{(k_{\mathrm{np}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\mathrm{Mex}}^{2}\omega^{2}}. \end{split}$$



Рис. 14. Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброскорости от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

Fig. 14. Dependence of the bandwidth of the vibration velocity of the VEMA frequency response on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness







- Рис. 15. Амплитудно-частотные характеристики ВЭМА по виброускорению при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины; в) суммарной колеблющейся массы
- Fig. 15. Frequency response of VEMA by vibration acceleration with varying parameters: a) viscous friction coefficient; b) spring stiffness; c) total oscillating mass

Комплексно-частотная характеристика по ускорению

$$W_{a}(j\omega) = \frac{R_{\text{mex}} j\omega^{3} - \omega^{2}(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{mex}}^{2}\omega^{2}};$$
  

$$W_{a}(j\omega) = \frac{-\omega^{2}(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{mex}}^{2}\omega^{2}} + \frac{R_{\text{mex}} j\omega^{3}}{(k_{\text{mp}} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{\text{mex}}^{2}\omega^{2}}.$$

Вещественная частотная характеристика по ускорению

$$P_{\rm a}(\omega) = \frac{-\omega^2 (k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2)}{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\rm mex}^2\omega^2}.$$

Мнимая частотная характеристика по ускорению

$$Q_{\rm a}(\omega) = \frac{R_{\rm Mex}\omega^3}{\left(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2\right)^2 + R_{\rm Mex}^2\omega^2}.$$

Амплитудно-частотная характеристика по ускорению (рис. 15)

$$\begin{split} A_{\rm a}(\omega) &= \left| W_{\rm a}(j\omega) \right| = \sqrt{P_{\rm a}(\omega)^2 + Q_{\rm a}(\omega)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{(-\omega^2(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2))^2 + (R_{\rm mex}\omega^3)^2}}{(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2)^2 + R_{\rm mex}^2\omega^2}. \end{split}$$

При $\omega{\to}\infty$ амплитуда виброускорения стремится к пределу

$$\lim_{\substack{\tilde{u}\to\infty\\\tilde{u}\to\infty}} A_a(\omega) = \frac{\sqrt{(-\infty^2(k_{\rm np}-m_{\Sigma}\infty^2))^2 + (R_{\rm Mex}\infty^3)^2}}{(k_{\rm np}-m_{\Sigma}\infty^2)^2 + R_{\rm Mex}^2\infty^2};$$
$$\lim_{\substack{\omega\to\infty\\\omega\to\infty}} A_a(\omega) \to \frac{1}{m_{\Sigma}}.$$

Производная по частоте от амплитудно-частотной характеристики по ускорению

$$dA_{-}\omega_{V}(\omega) = \frac{dA_{a}(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{(k_{np} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{Mex}^{2}\omega^{2}} \times \frac{4\omega^{3}k_{np}^{2} - 12\omega^{5}k_{np}m_{\Sigma} + 8\omega^{7}m_{\Sigma}^{2} + 6\omega^{5}R_{Mex}^{2}}{2\sqrt{\omega^{4}k_{np}^{2} - 2\omega^{6}k_{np}m_{\Sigma} + \omega^{8}m_{\Sigma}^{2} + \omega^{6}R_{Mex}^{2}}} - \frac{\sqrt{\omega^{4}k_{np}^{2} - 2\omega^{6}k_{np}m_{\Sigma} + \omega^{8}m_{\Sigma}^{2} + \omega^{6}R_{Mex}^{2}}}{[(k_{np} - m_{\Sigma}\omega^{2})^{2} + R_{Mex}^{2}\omega^{2}]^{2}} \times (-4(k_{np} - m_{\Sigma}\omega^{2})m_{\Sigma}\omega + 2R_{Mex}^{2}\omega).$$
(8)

Приравняем (8) к нулю. Решим полученное уравнение. Получим два корня. Отрицательный отбросим. Резонансная частота для амплитудночастотной характеристики по ускорению (рис. 15)

$$\omega_{a0} = \frac{-k_{\rm np}}{R_{\rm mex}^2 - 2k_{\rm np}m_{\Sigma}}\sqrt{4k_{\rm np}m_{\Sigma} - 2R_{\rm mex}^2}.$$

При стремлении вынуждающей частоты к частоте свободных колебаний механического контура амплитуда виброускорения аналогично стремится к максимуму, величина которого зависит от параметров механического контура

$$\begin{split} A_{\rm a}(\omega_0) &= \begin{cases} \left[ k_{\rm np} - \frac{m_{\Sigma} k_{\rm np}^2 (4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2)}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^2} \right]^2 + \\ + \frac{R_{\rm Mex}^2 (4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2) k_{\rm np}^2}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^2} \end{cases} \\ &+ \frac{\left[ \frac{k_{\rm np}^4 (4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2)^2}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^2} \right]^2} \\ &\times \begin{cases} \frac{k_{\rm np}^4 (4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2)^2}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^4} \\ \times \\ &\times \\ &\times \\ &+ \frac{\left[ k_{\rm np} - \frac{m_{\Sigma} k_{\rm np}^2 (4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2)^2}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^2} \right]^2} + \\ &+ \frac{(4m_{\Sigma} k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2)^3 k_{\rm np}^6 R_{\rm Mex}^2}{(-2k_{\rm np} m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2)^6} \end{cases} \end{split} \right]^2 \end{split}$$

Найдём частоты, ограничивающие полосу пропускания. Зная, что

$$\frac{A_a(\omega_0) - A_a(0)}{2} = \underset{\omega \to \omega_{a_{\text{mm}}^2}}{A(\omega)} = \underset{\omega \to \omega_{a_{\text{mm}}^{-1}}}{A(\omega)},$$

составим равенство

$$\begin{split} &\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \left(k_{\rm np} - \frac{m_{\Sigma}k_{\rm np}^2 \left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^2}\right)^2 + \\ &+ \frac{R_{\rm Mex}^2 \left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)k_{\rm np}^2}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^2} \end{bmatrix}^2 + \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{k_{\rm np}^4 \left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)^2}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^2} \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{k_{\rm np}^4 \left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)^2}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^2} \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{k_{\rm np}^4 \left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)^2}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^2} \end{bmatrix}^2 + \\ &+ \frac{\left(4m_{\Sigma}k_{\rm np} - 2R_{\rm Mex}^2\right)^3 k_{\rm np}^6 R_{\rm Mex}^2}{\left(-2k_{\rm np}m_{\Sigma} + R_{\rm Mex}^2\right)^6} \end{bmatrix}^2 \\ &= \frac{\sqrt{\left(-\omega^2 \left(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2\right)\right)^2 + \left(R_{\rm Mex}\omega^3\right)^2}}{\left(k_{\rm np} - m_{\Sigma}\omega^2\right)^2 + R_{\rm Mex}^2\omega^2}. \end{split}$$

Решим это уравнение и после процедуры отбора корней определим границы полосы пропускания для амплитудно-частотной характеристики по ускорению. Нижняя граничная частота полосы пропускания для амплитудно-частотной характеристики по ускорению (рис. 16, 17)

$$\omega_{a_{-}\mathrm{n}\mathrm{n}_{-1}} = \begin{bmatrix} \frac{R_{\mathrm{Mex}}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 2m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}^{3}}{-2(m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{Mex}}^{2} + R_{\mathrm{Mex}}^{4})} + \\ + \frac{\sqrt{3}k_{\mathrm{np}}^{2}R_{\mathrm{Mex}}\sqrt{4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}} - R_{\mathrm{Mex}}^{2}}}{2(m_{\Sigma}^{2}k_{\mathrm{np}}^{2} - 4m_{\Sigma}k_{\mathrm{np}}R_{\mathrm{Mex}}^{2} + R_{\mathrm{Mex}}^{4})} \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}}.$$



Рис. 16. Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины





Рис. 17. Зависимость нижней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

Fig. 17. Dependence of the lower limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration acceleration on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness

Верхняя граничная частота полосы пропускания для амплитудно-частотной характеристики по ускорению (рис. 18, 19)



Имея частоты, ограничивающие полосу пропускания, выведем выражение для ширины полосы

пропускания амплитудно-частотной характеристики по ускорению (рис. 20, 21)

$$\Delta \omega_{a\_\mathtt{nm}} = \omega_{a\_\mathtt{nm}\_2} - \omega_{a\_\mathtt{nm}\_1}.$$

## Исследование границ применимости метода идентификация параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонанстным частотам

Как видно из рис. 1, амплитудно-частотные характеристики ВЭМА по вибросмещению при относительно небольших значениях коэффициента вязкого трения  $R_{\rm mex}$  имеют явно выраженные максимумы, а при стремлении  $R_{\rm mex}$  к граничному зна-



Рис. 18. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины.

Fig. 18. Dependence of the higher limiting frequency of the frequency response of VEMA by vibration acceleration from the viscous friction coefficient with varying parameters a) total oscillating mass b) spring stiffness



Рис. 19. Зависимость верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

Fig. 19. Dependence of the higher limiting frequency of the VEMA frequency response by vibration acceleration on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness

чению  $R_{\text{мех}} \rightarrow R_{\text{мех}_{\text{гр}}} = 2\sqrt{k_{\text{пр}}} m_{\Sigma}$  резонансный пик становится более сглаженным. Очевидно, что существует некоторое предельное значение коэффициента вязкого трения  $R_{\text{мех}.\text{пре,f}}(m_{\Sigma.6}, k_{\text{пр.6}}) < R_{\text{мех}_{\text{гр}}}$ , при котором процесс вывода энергии из механического колебательного контура, т. е. демпфирование, преобладает над процессами взаимообмена энергии между пружинной с жесткостью  $k_{\text{пр.6}}$  и суммарной присоединенной массы  $m_{\Sigma.6}$ , где для известной конструкции ВЭМА-0,3 [11] за базовую величину жесткости пружины возьмем  $k_{\text{пр.6}} = 1,85 \cdot 10^5$  H/м, а за базовую величину суммарной присоединенной массы возьмем  $m_{\Sigma.6} = 1,157$  кг.

Если условие  $R_{\text{мех.пред}}(m_{\Sigma.6}, k_{\text{пр.6}}) < R_{\text{мех_гр}}$  не выполняется, то при попытке применения предложенного метода исследователь столкнется с тем, что результаты решения алгебраического уравнения (3)

являются комплексными корнями и применять описанный метод становится невозможным.

Исследование границ применимости метода идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонанстным частотам проведем на основе амплитудно-частотных характеристик по виброперемещению. Методика исследования границ применимости метода на основе АЧХ по виброскорости и виброускорению подобна описанной и в статье не приводится.

На основе вышеописанной математической модели механического контура ВЭМА найдены соотношения между предельными значениями коэффициента вязкого трения  $R_{\text{мех.пред}}$ , жесткости пружины  $k_{\text{пр.6}}$  и суммарной присоединенной массы  $m_{\Sigma.6}$ (таблица).



Рис. 20. Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от коэффициента вязкого трения при варьировании параметров: а) суммарной колеблющейся массы; б) жёсткости пружины





Рис. 21. Зависимость ширины полосы пропускания АЧХ ВЭМА по виброускорению от суммарной колеблющейся массы при варьировании параметров: а) коэффициента вязкого трения; б) жёсткости пружины

- Fig. 21. Dependence of the bandwidth of the VEMA frequency response by vibration acceleration on the total oscillating mass with varying parameters: a) total viscous friction coefficient; b) spring stiffness
- Таблица. Результаты исследования границ применимости метода идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонансным частотам на основе АЧХ по виброперемещению
- Table.
   Results of studying the limits of applicability of the method for identifying the parameters of vibrating electromagnetic activator mechanical system using near-resonance limits frequency method based on frequency response of VEMA by vibration displacement

$R_{\text{mex.mpeg}}(m_{\Sigma.6}, k_{\text{mp.6}})$	$0,5m_{\Sigma.6}$	$0,75m_{\Sigma.6}$	$m_{\Sigma.6}$	1,25 $m_{\Sigma.\delta}$	$1,5m_{\Sigma.6}$
$0,5k_{ ext{np.6}}$	267	327	377,5	422	462,5
$0,75k_{ ext{np.6}}$	327	400	462	433,7	566
$k_{\rm np.6}$	377	462	534	597	654
$1,25k_{{ m np.6}}$	422	517	597	667	731
$1,5k_{ ext{np.6}}$	462	566	654	731	801

По данным таблицы для удобства визуализации был построен трехмерный график функции от двух переменных  $R_{\text{мех.пред}}(m_{\Sigma.6}, k_{\text{пр.6}})$  (рис. 22).

На основании рис. 22 и таблицы видно, что предельное значение коэффициента вязкого трения  $R_{\text{мех.пред}}$  нелинейно возрастает при увеличении значения жесткости пружины  $k_{\text{пр.6}}$  и значения суммарной присоединенной массы  $m_{\Sigma.6}$ . В целом метод идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонанстным частотам является работоспособным при слабовыраженном ( $R_{\text{мех}} << R_{\text{мех.пред}}$ ) и средневыраженном ( $R_{\text{мех}} < R_{\text{мех.пред}}$ ) демпфировании. При условии сильного демпфирования колебаний в механическом контуре ВЭМА,

когда  $R_{\text{мех.пред}} \leq R_{\text{мех}} < R_{\text{мех.пр}}$ , описанный в статье метод применять нельзя.



- Рис. 22. Зависимость предельного значения коэффициента вязкого трения R<sub>мех.пред</sub> от жесткости пружины k<sub>пр.6</sub> и суммарной присоединенной массы т<sub>Σ.6</sub>
- Fig. 22. Dependence of the limiting value of the viscous friction coefficient  $R_{meh,lim}$  on spring stiffness  $k_{sp,b}$  and the total oscillating mass  $m_{\Sigma,b}$

#### Заключение

Подробно изложена уточненная версия метода идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонансным частотам, идея которой была ранее опубликовано в [19]. Метод по-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Neyman L.A., Neyman V.Y. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage // Proc. 2016 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. Novosibirsk, Russia, 2017. № 7884234. P. 23–27.
- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Влияние механических потерь на выходные показатели электромеханической колебательной системы с электромагнитным возбуждением // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 234–240.
- Neyman L.A., Neyman V.Y., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – Novosibirsk, Russia, 2017. – № 7981805. – P. 503–506.
- Pevchev V.P. The superexitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. - 2010. - V. 46. - № 6. - P. 656-665.
- Кувшинов К.А., Мойзес Б.Б., Крауиныш П.Я. Импульсно-вибрационный источник сейсмических сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 77–81.
- Simonov B.F., Neiman V.Y., Shabanov A.S. Pulsed Linear Solenoid Actuator for Deep-Well Vibration Source // Journal of Mining Science. – 2017. – V. 53 (1). – P. 117–125.
- Шнеерсон М.Б. Теория и практика наземной сейсморазведки. – М.: Недра, 1988. – 527 с.
- Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-Stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. - 2010. -V. 46 (6). - P. 656-665.

зволял вычислять оценки параметров механической колебательной системы, имеющей ярко выраженный резонансный пик по граничным околорезонансным частотам. Метод имел естественное ограничение – был применим только к гармоническим колебаниям механической системы с относительно невысоким демпфированием. Описанное в статье уточнение метода заключается в новом способе составления нелинейных алгебраических уравнений для нахождения околорезонансных частот, что позволяет учесть вышеприведенные замечания.

В работе проанализированы пределы изменения коэффициента вязкого трения, при которых применение описанного метода является возможным, а корни системы алгебраических уравнений являются вещественными. Исследованы вариации предельного значения коэффициента вязкого трения, при превышении которого корни нелинейных алгебраических уравнений становятся комплексными, а применение метода становится невозможным. На амплитудно-частотных характеристиках резонансный максимум при этом становится практически сглаженным.

Разработанный метод имеет признаки универсальности и может быть рекомендован не только для идентификации параметров механической системы вибрационного электромагнитного активатора по граничным околорезонансным частотам, но и для исследования, мониторинга и настройки других механических колебательных систем, содержащих вибровозбудители.

- Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154–162.
- Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article / S.C. Magalhnes, C.M. Scheid, L.A. CalHada, M.M. Lutterbach, R.S. Rezende, A.T.A. Waldmann // Journal of Natural Gas Science and Engineering. March 2016. V. 30. P. 164–175.
- Данекер В.А., Рикконен С.В. Приготовление и коррекция показателей бурового раствора технологией и оборудованием ВСМА // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 86–92.
- Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // Journal of Mining Science. - 2009. - V. 45. - № 4. - P. 372-381.
- Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids / Chuhan Liu, Yin Zhang, Shanshan Sun, Lixin Huang, Li Yu, Xiaonan Liu, Ruiqiu Lai, Yijing Luo, Zhiyong Zhang, Zhongzhi Zhang // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 14–20.
- Analysis of oil content in drying petroleum sludge of tank bottom / Yuhua Wang, Xiaomin Zhang, Yuying Pan, Ying Chen // International Journal of Hydrogen Energy. - 2017. -V. 42. -№ 29. - P. 18681-18684.
- Da S.L., Alves F.C., De França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries // Waste Management & Research. - 2012. - V. 30 (10). -P. 1016-1030.

- Lushnikov S.V., Frank Y.A., Vorobyov D.S. Oil decontamination of bottom sediments experimental work result // Earth science research journal. - 2006. - V. 10. - № 1. - P. 35-40.
- 17. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport and Storage of Hydrocarbons. - 2016. - V. 154. - 7 p. URL: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/ 154/1/012003 (дата обращения 13.06.2018).
- Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer Simulation of Stress Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 125: Materials Treatment: Current Problems and Solutions. 7 p.
- Резонансные колебания с предельной амплитудой в вибрационом электромагнитном активаторе / А.Н. Гаврилин, Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 201–213.
- Aver'yanov G.S., Khamitov R.N., Zubarev A.V. Dynamics of oscillatory systems with controllable shock absorbers // Russian Engineering Research. - 2008. - V. 28 (6). - P. 543-547.
- Melkebeek J. Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling. - Cham: Springer, 2018. - 734 p.
- 22. Boguslawsky I., Korovkin N., Hayakawa M. Large A.C. Machines. Tokyo, Springer, 2017. 550 p.

- Khamitov R.N., Aver'yanov G.S., Korchagin A.B. Pneumatic shock absorber with an active damping system // Russian Engineering Research. – 2009. – V. 29 (9). – P. 871–873.
- Биндерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
- Graham Kelly S. Mechanical Vibrations. Theory and applications. – Boston: Cengage Learning, Inc., 2012. – 898 p.
- 26. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.
- 27. Thede L. Analog and digital filter design using C. 3<sup>d</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 352 p.
- Linge S., Langtangen H.P. Programming for Computations MATLAB/Octav. – Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2016. – 228 p.
- Positive solutions for a nonlinear algebraic system with nonnegative coefficient matrix / Y. Du, W. Feng, Y. Wang, G. Zhang // Applied Mathematics Letters. - 2017. - V. 64. - P. 150-155.
- Di Franco P., Scarciotti G., Astolfi A. A note on the stability of nonlinear differential-algebraic systems // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – V. 50. – Iss. 1. – P. 7421–7426.

Поступила 11.02.2019 г.

## Информация об авторах

*Гаврилин А.Н.*, кандидат технических наук, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Кладиев С.Н.*, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Боловин Е.В.**, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Полищук В.И., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 621.313.282.2: 621.316.79

# IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF VIBRATION ELECTROMAGNETIC ACTIVATOR MECHANICAL SYSTEM USING LIMITING NEAR-RESONANCE FREQUENCY

## Alexey N. Gavrilin<sup>1</sup>,

tom-gawral@list.ru

Sergey N. Kladiev<sup>1</sup>, kladiev@tpu.ru

Alexander S. Glazyrin<sup>1</sup>,

asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy V. Bolovin<sup>1</sup>,

bolovinev@mail.ru

## Vladimir I. Polishchuk<sup>2</sup>,

polischuk vi@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Polzunov Altai State Technical University,
 46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact that vibration electromagnetic activators are effective devices for mixing suspensions, emulsions, preparing drilling fluids, liquefying highly viscous petroleum products. Armature has special design is a hydraulic rectifier. When the armature vibrates at near-resonance frequencies, deeply submerged jets are created in the treated fluid medium, which ensure high efficiency of mixing fluid medium and decrease in viscosity of petroleum products for a long time at relatively low energy consumption of the vibration electromagnetic activator. The resonant frequency of the mechanical system depends on spring stiffness, mass of the armature-activator, added mass of the fluid oscillating with the armature and viscous friction coefficient that determines the removal of energy from the vibration mechanical system. When the rheological properties of the treated fluid change, both the parameters of the mechanical vibration system and the type of frequency response of the vibration electromagnetic activator change in the rheological properties of a treated fluid medium with the vibration electromagnetic activator based on direct measurements, for example using viscometers, is suitable only for laboratory conditions and is not suitable for when analyzing the vibration electromagnetic activator frequency response in particular limiting near-resonance frequency, one can get reliable estimates of the parameters of the vibration electromagnetic activator frequency response in particular limiting near-resonance frequency, one can get reliable estimates of the parameters of the vibration electromagnetic activator frequency response of the treated fluid during the vibration electromagnetic activator vibration preving approach is based on solving an inverse mathematical problem when analyzing the vibration electromagnetic activator frequency response of the treated fluid during the vibration electromagnetic activator vibration prevences of the vibration electromagnetic activator

**The main aim** of the research is to design the parameters identification of the vibration electromagnetic activator mechanical system using limiting near-resonance frequency method and to determine the method's limits of applicability in high damping vibration mechanical systems.

**Research methods:** ordinary differential equations, Laplace transform, transmissibility, frequency response, algebraic equations. **Results.** The authors have obtained the analytical expressions relating the limiting near-resonance frequency to the parameters of a vibration mechanical system. Based on the latter the system of algebraic equations was obtained. The method's limits of applicability in high damping vibration mechanical systems are shown.

#### Key words:

Vibration electromagnetic activator, mechanical system, parameters, identification, resonance, frequency response, limiting near-resonance frequency.

#### REFERENCES

- Neyman L.A., Neyman V.Y. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage. 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. Novosibirsk, Russia, 2017. No. 7884234, pp. 23–27.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Vliyaniye mekhanicheskikh poter na vykhodnye pokazateli elektromekhanicheskoy kolebatelnoy sistemy s elektromagnitnym vozbuzhdeniem [The effect of mechanical losses on the output indicators of electromechanical oscillatory system with electromagnetic excitation]. Aktualnye problemy v mashinostroyenii, 2016, no. 3, pp. 234–240.
- Neyman L.A., Neyman V.Y., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM.* Novosibirsk, Russia, 2017. No. 7981805, pp. 503-506.
- 4. Pevchev V.P. The superexitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656-665.
- Kuvshinov K.A., Moizes B.B., Krauinsh P.Ya. Pulse-vibration source of seismic signals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Uni*versity, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 77–81. In Rus.

- Simonov B.F., Neiman V.Y., Shabanov A.S. Pulsed Linear Solenoid Actuator for Deep-Well Vibration Source. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53 (1), pp. 117–125.
- Shneerson M.B. Teoriya i praktika nazemnoy seysmorazvedki [Theory and practice of ground seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 527 p.
- Pevchev V.P. Science of mining machines the superexcitation and efficiency relation in a short-Stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46 (6), pp. 656–665.
- Neyman L.A., Neyman V.U. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and lowfrequency vibrations generation systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162. In Rus.
- Magalhnes S.C., Scheid C.M., CalHada L.A., Lutterbach L.M.M., Rezende R.S., Waldmann A.T.A.. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 164–175.
- Daneker V.A., Rikkonen S.V. Preparation and correction of drilling mud by technology and equipment of vibro-jet-magnetic activation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 86–92. In Rus.
- Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381.
- Chuhan Liu, Yin Zhang, Shanshan Sun, Lixin Huang, Li Yu, Xiaonan Liu, Ruiqiu Lai, Yijing Luo, Zhiyong Zhang, Zhongzhi Zhang. Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 14–20.
- Yuhua Wang, Xiaomin Zhang, Yuying Pan, Ying Chen. Analysis of oil content in drying petroleum sludge of tank bottom. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 29, pp. 18681–18684.
- Da S.L., Alves F.C., De França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. Waste Management & Research, 2012, vol. 30 (10), pp. 1016-1030.
- Lushnikov S.V., Frank Y.A., Vorobyov D.S. Oil decontamination of bottom sediments experimental work result. *Earth science re*search journal, 2006, vol. 10, no. 1, pp. 35–40.
- 17. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport*

and Storage of Hydrocarbons, 2016, vol. 154, 7 p. Available at: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/ 154/1/012003 (accessed 13 June 2018).

- Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer Simulation of Stress Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125, 7 p.
- Gavrilin A.N., Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Polishchuk V.I. Resonant oscillations with a limiting amplitude in a vibration electromagnetic activator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 201–213. In Rus.
- Aver'yanov, G.S., Khamitov, R.N., Zubarev, A.V. Dynamics of oscillatory systems with controllable shock absorbers. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28 (6), pp. 543-547.
- 21. Melkebeek J. Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling. Cham, Springer, 2018. 734 p.
- Boguslawsky I., Korovkin N., Hayakawa M. Large A.C. Machines. Tokyo, Springer, 2017. 550 p.
- Khamitov R.N., Aver'yanov G.S., Korchagin A.B. Pneumatic shock absorber with an active damping system. *Russian Engine*ering Research, 2009, vol. 29 (9), pp. 871-873.
- Binderman V.L. *Teoriya mehanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical vibrations]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980. 408 p.
- Graham Kelly S. Mechanical Vibrations. Theory and applications. Boston, Cengage Learning, Inc., 2012. 898 p.
- 26. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of parameters of mechanical system on the example of a vibratory electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177.
- Thede L. Analog and digital filter design using C. 3<sup>d</sup> ed. New Jersey, Prentice Hall, 2005. 352 p.
- Linge S., Langtangen H.P. Programming for Computations -MATLAB/Octav. Luxembourg, Springer Science+Business Media, 2016. 228 p.
- Du Y., Feng W., Wang Y., Zhang G. Positive solutions for a nonlinear algebraic system with nonnegative coefficient matrix. *Applied Mathematics Letters*, 2017, vol. 64, pp. 150–155.
- Di Franco P., Scarciotti G., Astolfi A. A note on the stability of nonlinear differential-algebraic systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, Iss. 1, pp. 7421–7426.

Received: 11 February 2019.

#### Information about the authors

Alexey N. Gavrilin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniy V. Bolovin, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Polishchuk, Dr. Sc., professor, Polzunov Altai State Technical University.

УДК 622.276.53

# ДИАГНОСТИКА УРАВНОВЕШЕННОСТИ ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПО ВАТТМЕТРОГРАММЕ

## Зюзев Анатолий Михайлович<sup>1</sup>,

a.m.zyuzev@urfu.ru

## Бубнов Матвей Владимирович<sup>1</sup>,

m.v.bubnov@urfu.ru

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Актуальность** исследования обусловлена широким распространением штанговых глубинных насосных установок с нерегулируемым приводом, которые в основной своей массе оснащены исключительно средствами механической настройки. Эксплуатация установок данного типа сопровождается значительными потерями как потребляемой электроэнергии, так и добытой нефти, связанными с работой установки в неоптимальном режиме. Для решения данной проблемы как новые, так и уже эксплуатируемые штанговые глубинные насосные установки оборудуют станциями управления, в состав которых входят преобразователь частоты и программируемый логический контроллер, оснащенный средствами интеллектуального управления и диагностики. Реализация данных функций на контроллере станции управления штанговых глубинных насосных установок требует разработки соответствующих алгоритмов, обеспечивающих автономное, высокоэффективное, экономичное и надежное функционирование установки в течение всего срока эксплуатации.

**Цель:** разработка алгоритмов определения уравновешенности станка-качалки, оптимального положения противовеса и моментов прохождения штоком «мертвых точек».

**Объекты:** штанговая глубинная насосная установка в различных режимах работы, уравновешенность станка-качалки, определяемая положением противовесов на кривошипе.

**Методы:** математический аппарат дифференциальных уравнений и передаточных функций, компьютерное моделирование, сопоставление и анализ графиков и диаграмм.

**Результаты.** Рассмотрены способы определения уравновешенности, существующие в настоящий момент, и выявлены их недостатки. Ниболее доступным и надёжным средством диагностирования штанговых глубинных насосных установок, не требующим дополнительных навесных датчиков, является ваттметрирование. Для исследования закономерностей и режимов работы разработана компьютерная модель штанговых глубинных насосных установок. На основе данных, полученных в ходе моделирования, разработаны алгоритмы определения уравновешенности станка-качалки, оптимального положения противовеса и «мертвых точек», которые не требуют установки на станок внешних датчиков, могут работать в составе программного обеспечения интеллектуальных станций управления штанговых глубинных насосных установок, обеспечивая простоту контроля, обслуживания и сокращение издержек.

#### Ключевые слова:

Нефтяная промышленность, штанговая глубинная насосная установка, станок-качалка, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, контроллер, интеллектуальная станция управления, ваттметрограмма, коэффициент уравновешенности, противовес, мертвая точка, диагностика.

#### Введение

Промышленное применение асинхронного электропривода достаточно широко. Это утверждение полностью справедливо и в отношении сферы нефтедобычи, где подавляющее число механизмов, выполняющих основную полезную работу, составляют штанговые глубинные насосные установки (ШГНУ). ШГНУ представляет собой комплекс оборудования для механизированного подъема жидкости из скважины с помощью погружного плунжерного насоса, которому сообщает возвратно-поступательное движение через кривошипнобалансирный привод (станок-качалку), редуктор и клиноременную передачу асинхронный двигатель [1–3].

Распространенность данного способа добычи обусловлена такими преимуществами, как: высокий коэффициент полезного действия, эффективность применения при низком дебите скважины и на скважинах с тяжелыми условиями добычи (в пескопроявляющих скважинах, при высоком содержании в добываемой нефти парафинов и газа), относительная простота и надёжность конструкции, возможность проведения ремонтных работ, обслуживания и регулировки непосредственно на объекте работниками низкой квалификации, малое влияние физико-химических свойств поднимаемой жидкости на работу ШГНУ [4].

В силу распространенности ШГНУ внедрению энергосберегающих технологий их эксплуатации в последнее время уделяется особое внимание. Несмотря на то, что привод основного числа установок остаётся нерегулируемым, наблюдается тенденция к всё большему внедрению преобразователей частоты, что позволяет применять новые экономичные способы управления [5]. Одним из путей реализации данного подхода стали интеллектуальные станции управления. Они характеризуются расширенным функционалом по сбору, обработке, анализу и передаче информации, отказом от использования дополнительных датчиков, продвинутыми алгоритмами управления.

Необходимость использования в станции управления алгоритмов, позволяющих отказаться от установки дополнительных датчиков помимо тех, что уже содержатся в преобразователе частоты (датчики тока и напряжения), имеет конкретные технологическое предпосылки. Ключевым средством диагностики ШГНУ является динамометрирование. Данное средство даёт максимально полную информацию как о состоянии самого погружного насоса, такую как: обрыв штанг, залипание либо пропускание всасывающего или нагнетательного клапана, низкая посадка плунжера, его выход из цилиндра невставного насоса, удар о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса; так и о режиме его работы: превышение подачи насоса над притоком жидкости в скважину и степень влияния газа, фонтанирование жидкости через насос.

Получение динамограммы обеспечивается специальным прибором – динамографом, который оснащен внешними датчиками усилия и перемещения. Датчик усилия устанавливается на балансире, на штоке или чаще всего между траверс канатного подвеса штока. Датчик перемещения, как правило, располагается на штоке или на кривошипе. Таким образом, датчики динамографа располагаются на элементах конструкции, находящихся в непрерывном движении, поэтому гибкий подвод кабеля подвержен быстрому перетиранию, износу и риску обрыва массивными движущимися частями конструкции [6, 7].

Распространенным решением указанных проблем является отказ от применения стационарных динамографов и переход на переносные динамографы, которые передаются в распоряжение мобильных бригад технического обслуживания. Такой подход также сопряжен с рядом недостатков: во-первых, установка такого динамографа требует полной остановки станка и разведения траверс подвеса штанг, что приводит и к потерям в добыче, во-вторых, проведение плановых проверок не может обеспечить своевременного обнаружения неоптимальной настройки ШГНУ, что также приводит к дополнительным потерям. Таким образом, отчетливо видна необходимость перехода к более простым в реализации, точным и надежным способам диагностики, не требующим установки внешних навесных датчиков, основой которых может стать ваттметрирование [8-11].

#### Известные способы

Одним из основных параметров настройки станка-качалки является положение противовеса. Вес противовеса уравновешивает нагрузку на штоке ШГНУ, которая определяется динамическим уровнем, диаметром плунжера, плотностью жидкости и весом штанг в жидкости. Динамический уровень представляет собой глубину от устья скважины, на которой устанавливается уровень пластовой жидкости в затрубном пространстве при работе насоса. При изменении притока жидкости в скважину меняется соответственно и динамический уровень, при этом положение противовеса становится неоптимальным, что приводит к дополнительным потерям. Таким образом, до следующего технического обслуживания, при котором будет проведена балансировка станка качалки, установка будет работать с повышенными потерями. Кроме того, определение оптимального положения противовеса, как правило, ведётся по максимальному отклонению стрелки амперметра при ходе штока вверх и вниз [12]. Такая процедура настройки требует неоднократного повторения трудоемкого перемещения противовеса, пока не будет подобрано наиболее оптимальное положение, точность определения которого, так или иначе, будет невысока.

Поскольку стандартного подхода к определению уравновешенности станка-качалки в настоящее время не существует, далее рассмотрим различные предлагаемые способы решения данной проблемы. Известны несколько способов определения уравновешенности станка-качалки, отличающихся по своей методологии. В руководствах по эксплуатации нефтяных скважин традиционно даются указания по определению коэффициента уравновешенности с помощью токоизмерительных клещей [13]. Согласно руководству, необходимо определить максимальные значения тока при ходе штока штанговой установки вверх  $I_{\rm B}$  и вниз  $I_{\rm H}$ , затем найти коэффициент неуравновешенности станка-качалки:

$$K_{\rm H.I} = \frac{I_{\rm B} - I_{\rm H}}{I_{\rm B} + I_{\rm H}} \cdot 100 ~\%.$$

Недостаток данного способа заключается в существенной инерционности токоизмерительных клещей, откуда следует погрешность в определении коэффициента уравновешенности и неоднозначность в его значении при сильной разбалансировке станка-качалки.

Известен способ [14], где в качестве исходных данных использует мгновенные значения тока и напряжения на входе электропривода, на основе которых рассчитывают потребляемую реактивную мощность и проводят её гармонический анализ, а затем находят отношение второй гармоники к первой и значение полученного коэффициента сравнивают с эталонным для данной скважины.

Способ [15] заключается в том, что с эталонным значением среднеквадратичного отклонения полной мощности сравнивают среднеквадратичное отклонение полной мощности, определенное из произведения действующих значений тока и напряжения, вычисленных при минимальном или максимальном смещении штока от точки подвеса и при производной значения давления, не равной нулю, вычисленных по величине перемещения штока и мгновенному значению давления. Недостатками данных способов являются: сложность проведения гармонического анализа с использованием процедуры дискретного преобразования Фурье в первом способе, необходимость установки на шток ШГНУ датчиков перемещения и давления во втором, а также необходимость использования эталонных коэффициентов, расчет которых необходимо предварительно проводить для каждой исследуемой установки.

Также известен способ [16], где решение поставленной задачи заключается в измерении мгновенных значений скорости вращения ротора приводного электродвигателя за один период качания, определении минимальных значений мгновенной скорости при подъеме  $V_{1\min}$  и опускании  $V_{2\min}$  штока, сравнении этих значений и определении состояния уравновешенности из условия:

$$|V_{1\min} - V_{2\min}| < \frac{0, 1(V_{1\min} + V_{2\min})}{2}.$$

Недостатком способа является невозможность дать количественную оценку степени уравновешенности.

Согласно способу [17], коэффициент неуравновешенности определяется по максимальным мгновенным значениям активной мощности при ходе штока вверх *P*<sub>вмах</sub> и вниз *P*<sub>нмах</sub>:

$$K_{\rm H.P} = \frac{(P_{\rm Bmax} - P_{\rm Hmax})}{(P_{\rm Bmax} + P_{\rm Hmax})} \cdot 100 \%$$

Общим недостатком способов [16, 17] является то, что для определения уравновешенности используются мгновенные значения скорости или мощности, а не интегральная оценка на периоде качания ШГНУ, такая как, например, энергия. Это не позволяет получить вполне точный результат по балансировке ШГНУ с точки зрения главного критерия уравновешенности – минимума потребляемой энергии.

В способе [18] в качестве интегрального показателя качества уравновешивания предложен коэффициент уравновешенности по потерям, определяемый отношением средних потерь при ходе штока вверх  $\Delta P_{\rm CP,B}$  и вниз  $\Delta P_{\rm CP,H}$ :

$$K_{\rm yp,\Delta P} = \frac{\Delta P C P_{\rm CP,B}}{\Delta P_{\rm CP,H}},$$

наряду с которым может быть использован коэффициент уравновешенности по среднеквадратичному току при ходе штока вверх  $I_{\rm CP,B}$  и вниз  $I_{\rm CP,H}$ :

$$K_{\rm yp.I} = \frac{I_{\rm CP.B}}{I_{\rm CP.H}}.$$

Недостатком способа является то, что при обработке и восприятии информации необходимо оперировать численным значением коэффициента уравновешенности, которое может принимать отрицательные значения, что вызывает определенные трудности для эксплуатирующего персонала. Кроме того, для реализации данного способа предлагается оборудовать механизм датчиком положения или путевыми датчиками для определения моментов прохождения механизмом «мертвых точек», что усложняет конструкцию установки и снижает её надежность, поскольку навесные датчики на подвижной конструкции подвержены сильным внешним воздействиям.

Общим недостатком всех указанных выше способов является то, что информация о коэффициенте уравновешенности, получаемая при этом, не содержит конкретных рекомендаций обслуживающему персоналу, куда и на сколько необходимо переместить противовес станка-качалки, поэтому требуется проводить несколько операций последовательного подбора оптимального положения.

#### Алгоритм определения уравновешенности

Для разработки алгоритма определения уравновешенности станка-качалки требуется глубокое понимание принципов и закономерностей работы штанговой глубинной насосной установки в целом. Такое понимание может обеспечить компьютерная модель ШГНУ [19-23], выполненная например, в среде PascalABC.NET, более подробное описание которой дано в работе [24, 25]. Общий вид исследуемой модели ШГНУ типа ПШГН8-3-5500, оснащенной двигателем 4A200L6У3 (30 кВт, 1000 об/мин), представлен на рис. 1. Основными параметрами для моделирования являются геометрические размеры элементов конструкции станка-качалки, их массы, параметры упругости штанговой колонны, глубина спуска и диаметр насоса, динамический уровень и плотность жидкости в скважине, передаточные отношения редуктора и клиноременной передачи, параметры Т-образной схемы замещения двигателя и параметры силового преобразователя. Она позволяет получать визуальное представление о движении механизма и параллельно выводить динамограмму, ваттметрограмму, диаграмму момента двигателя и её составляющие от сил тяжести противовеса и оголовка по отдельности, а также расчет энергии, потребляемой за цикл качания.

Широкие возможности компьютерной модели обеспечивают доступность необходимых выходных переменных, что позволяет перейти к статистической обработке получаемых данных. Основным критерием в определении уравновешенности станка-качалки был выбран показатель минимального энергопотребления. В основу разработки алгоритма положены утверждения отдельных авторов [17, 26], а также результаты собственных исследований, из которых следует, что оптимальным условием уравновешивания по минимуму потребляемой электроприводом ШГНУ энергии является равенство энергий, затрачиваемых на подъем и опускание штока. Для проверки данного утверждения в модели ШГНУ при установившемся режиме работы оценивалась энергия, потребляемая электроприводом при ходе штока вверх и вниз, с изменением радиуса расположения противовеса на кривошипе с шагом 0,01 м от одного крайнего положения до другого (повторение подобного эксперимента на реальной установке невозможно в силу конструктивно ограниченного количества мест установки противовеса на кривошипе).


Fig. 1. Sucker-rod pumping unit (SRPU) model common view in PascalABC.NET environment

На рис. 2 представлены расчетные зависимости потребляемой электроприводом ШГНУ энергии от радиуса установки противовеса, полученные при указанных выше условиях моделирования для скважины со следующими параметрами:

- глубина спуска насоса 1142 м;
- динамический уровень 800 м.

Как видно на рис. 2, графики зависимости энергий, затрачиваемых на подъем W<sub>в</sub> и опускание штока  $W_{\rm H}$ , от радиуса расположения противовеса на исследуемом участке представляют собой прямые, а зависимость полной энергии W<sub>II</sub> за цикл качания станка-качалки, которая является суммой энергий, затрачиваемых на ход штока вверх и вниз, от радиуса имеет параболический характер. На параболическом графике полной энергии есть точка минимума, координата которой по горизонтальной оси и даёт оптимальный радиус расположения противовеса  $R_{\Pi}=1,2$  м. Точка пересечения прямых дает значение радиуса  $R_{\Pi}=1,25$  м, при котором равны затраты энергии на подъем и опускание штока. Как видим, радиусы можно считать приблизительно равными с погрешностью менее 5~%, при том, что разница полных энергий за цикл составляет менее 0,1~% .

Исходя из принятого положения, алгоритм оценки качества уравновешивания включает в себя вычисление энергии  $W_{\rm A}$ , потребляемой двигателем при ходе штока вверх и вниз по общему выражению на основе данных о мгновенной мощности двигателя  $P_{\rm A}$ , формируемых в контроллере преобразователя частоты:

$$W_{\rm II} = \int_{t=0}^{T_{\rm II}} P_{\rm II} dt, \qquad (1)$$

где  $T_{\rm II}$  – временной интервал интегрирования (длительность подъема или опускания штока); dt – шаг интегрирования по времени при численном интегрировании.

Для разделения значений энергии при ходе вверх –  $W_{\rm B}$  и вниз –  $W_{\rm H}$  необходимо выполнять интегрирование мощности по выражению (1) на интервале движения штока вверх –  $T_{\rm II}$ = $t_{\rm B}$  и вниз –  $T_{\rm II}$ = $t_{\rm H}$ .

Оценку качества уравновешивания для наглядности рекомендуется формировать в виде числового значения коэффициента уравновешенности  $K_{\rm yp}$ :



Рис. 2. Графики зависимости потребляемой энергии от положения грузов

Fig. 2. Plots of consumed energy vs. weights position

$$K_{\rm yp} = \begin{cases} \frac{W_{\rm B}}{W_{\rm H}} + 1 \\ \frac{W_{\rm H}}{2} \cdot 100 \ \%, \ \text{при } W_{\rm B} \le W_{\rm H}; \\ \frac{W_{\rm H}}{W_{\rm B}} + 1 \\ \frac{W_{\rm B}}{2} \cdot 100 \ \%, \ \text{при } W_{\rm H} < W_{\rm B}. \end{cases}$$
(2)

Очевидно, идеальному уравновешиванию соответствует значение коэффициента  $K_{yp}=100$  %. При  $K_{\rm yp}{<}100~\%$  установка считается неуравновешенной, причём чем меньше  $K_{\rm VP}$ , тем сильнее разбалансирована ШГНУ. Небольшое отклонение  $K_{yp}$ от 100 % при работе ШГНУ допускается, необходимость остановки механизма и перемещения противовеса в более оптимальное положение определяется в каждом конкретном случае текущими приоритетами и техническими возможностями. Минимальное значение  $K_{yp}=0$  % не достижимо на практике в силу конструктивного ограничения диапазона перемещения противовеса на кривошипе. Из формулы (2) также следует, что нет необходимости определять, при подъёме или при опускании штока измерена энергия, достаточно подставить в формулу два последовательных значения энергии за половину цикла согласно указанному условию.

## Алгоритм определения оптимального положения противовеса

Из графиков на рис. 2 видно, что зависимости энергии, потребленной при ходе вверх и вниз, от радиуса противовеса имеют практически линейный характер. Кроме того, равны по модулю и отличны по знаку углы наклона этих прямых. Причем, как показали исследования на модели электропривода ШГНУ, угол наклона этих прямых не зависит от динамического уровня и глубины спуска насоса. Исходя из этого, зная тангенс наклона прямых и текущие значения энергий при ходе вверх и вниз, а также радиус противовеса, можно определить уравнения этих прямых. Определив уравнение хотя бы одной из прямых, мы можем рассчитать оптимальное по энергопотреблению положение противовеса.

Уравнения зависимости энергии при ходе вверх  $W_{\rm B}$  и вниз  $W_{\rm H}$  от радиуса противовеса могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} W_{\rm B} = -AR + B_{\rm B}; \\ W_{\rm H} = AR + B_{\rm H}, \end{cases}$$

где A – тангенс угла наклона прямых; R – радиус противовеса;  $B_{\rm B}$  и  $B_{\rm H}$  – коэффициенты смещения прямых.

Для определения коэффициента *А* требуется как минимум две точки искомой прямой. Поэтому первый запуск ШГНУ будет «пробным»: при этом необходимо занести в память текущее значение радиуса противовеса, дать станку отработать некоторое время, например, пять циклов, и задать команду «Идентификация» для сохранения текущих параметров. После этого требуется остановить механизм, произвольно сдвинуть грузы на некоторую величину и запустить его снова, записав при этом в память новое значение радиуса. Значение коэффициента *А* находим по следующим выражениям:

$$A_{\hat{A}} = \frac{W_{BB} - W_{B}}{R_{D} - R};$$
  
$$A_{f} = \frac{W_{HH} - W_{H}}{R_{D} - R};$$
  
$$A = \frac{A_{H} - A_{B}}{2},$$

где  $W_{\rm BB}, W_{\rm HH}, R$  – значения энергии и радиуса противовеса, полученные на предварительном запуске.

При выполнении указанных условий алгоритм выдаст значение коррекции положения грузов для достижения оптимального энергопотребления – это будет в той точке, где энергия равняется половине полной энергии за цикл, что определяется следующим выражением:

$$R_{\rm yp} = \frac{\frac{W_{\rm B} + W_{\rm H}}{2} - (W_{\rm B} + AR)}{-A};$$

При этом величина смещения может быть получена из следующей формулы:

$$R_{\rm CM} = R_{\rm yp} - R.$$

В случае необходимости обновления результатов работы алгоритма следует задать команду «сброс» и повторить процедуру.

#### Алгоритм определения «мертвых точек»

Одним из главных недостатков некоторых способов определения уравновешенности является необходимость получения информации о положении штока от внешних датчиков. Как уже было сказано выше, применение таких датчиков значительно снижает надёжность системы в целом. Тем не менее, разработанные алгоритмы требуют наличия информации о прохождении станком-качалкой «мертвых точек». Эту информацию также предлагается формировать на основе ваттметрограммы, относительно доступной для получения стандартными средствами станции управления ШГНУ.

Для этого логическому анализу были подвергнуты диаграммы момента двигателя, поскольку при практически постоянной скорости, на которой работает установка, диаграммы момента и мощности имеют одинаковую форму, с разницей только в масштабе друг относительно друга. Изучение форм диаграмм и различные их преобразования привели к следующим выводам: если текущую диаграмму момента (мощности) двигателя сложить с той же самой диаграммой, но сдвинутой на половину периода качания станка-качалки, то полученная диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 3, где показаны диаграммы суммарного момента при различных положениях противовеса  $(M_{0.9}, M_{1.2}, M_{1.5}, M_{1.7})$ . Сопоставим данную суммарную диаграмму с диаграммой момента  $M_0$ , создаваемого на валу двигателя нагрузкой на оголовке станка-качалки, состоящей из веса оголовка и усилия на штоке. На рис. 3 видно, что абсциссы минимумов суммарной диаграммы соответствуют точкам перехода через ноль диаграммы момента оголовка, которые и показывают момент времени прохождения крайнего верхнего и крайнего нижнего положения балансира. Минимумы на графике суммарного момента несколько опережают по времени прохождение «мертвых точек», тем самым обеспечивается компенсация вычислительного запаздывания системы.

Таким образом, о прохождении станком-качалкой «мертвой точки» свидетельствуют минимумы на диаграмме суммы текущей мощности и мощно-



Рис. 3. Суммарная диаграмма моментов и диаграмма момента, создаваемого на валу двигателя оголовком с нагрузкой

Fig. 3. Summarized torques diagram and diagram of horse head torque on motor shaft under load

сти, измеренной в момент времени, предшествующий половине периода качания ШГНУ. Чтобы определить период качания балансира, не прибегая к внешним датчикам и методам визуально контроля, необходимо вычислить разность значений временных меток двух последовательных наибольших максимумов на диаграмме мощности.

На следующем шаге, необходимом для определения оптимального положения противовеса, требуется установить, какой временной интервал между «мертвыми точками» соответствует подъему, а какой – опусканию штока, иными словами – какая «мертвая точка» является верхней, а какая – нижней. Поскольку в моменты прохождения «мертвых точек» положения кривошипа станка-качалки несимметричны относительно центра его вращения, то измерив его угловой путь, можно однозначно определить тип «мертвой точки». При нормальном режиме работы ШГНУ проскальзывания в его передачах отсутствуют, поэтому можно перейти к определению углового перемещения вала двигателя, расчет которого ведётся интегрированием скорости вращения двигателя. Таким образом, с учетом геометрии станка-качалки устанавливаем, что верхней «мертвой точке» предшествует меньшее угловое перемещение вала двигателя, а нижней – большее.

#### Заключение

Анализ существующих подходов к диагностированию уравновешенности ШГНУ позволил выявить основные недостатки применяемых решений и сформировать задачу настоящего исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Ч. 2. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 272 с.
- Лаврушко П.Н., Муравьев В.М. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1974. 367 с.
- Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.И. Ивановский, В.И. Даритцев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: Нефть и Газ, 2002. – 824 с.
- An approach to the optimum design of sucker-rod pumping system / X. Liu, Y. Qi, J. Wu, L. Yang, F. Chen // WASE International Conference on Information Engineering (ICIE). Beidaihe, 2010. V. 3. P. 140–143.
- Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption // IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). - Omsk, 2015. - P. 1-4.
- Бубнов М.В., Зюзев А.М. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 175–178.
- Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН / М.И. Хакимьянов, С.В. Светлакова, Б.В. Гузеев, Я.Ю. Соловьев, И.В. Музалев // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – С. 1–22.

На компьютерной модели ШГНУ исследовано функционирование установки в различных режимах: при изменении параметров скважины – динамического уровня, конфигураций механизма, таких как глубина спуска насоса и положение противовеса на кривошипе; регулировании производительности заданием различных скоростей вращения двигателя. Изучены закономерности процессов, протекающих в установившемся режиме работы ШГНУ: колебания нагрузок на отдельных элементах конструкции станка-качалки, а также преобразование энергии на всех этапах цикла качания. Полученные зависимости представлены графически и подвергнуты аналитической обработке. На основе полученных результатов разработаны алгоритмы определения уравновешенности станка-качалки, оптимального положения противовеса и «мертвых точек».

Сформированный алгоритм является частью систем диагностики ШГНУ и может быть адаптирован для использования в интеллектуальных станциях управления, что в совокупности с удаленной диспетчеризацией обеспечивает простые и понятные выходные данные для мониторинга состояния ШГНУ, своевременное и качественное обслуживание оборудования, простоту, высокую скорость и точность настройки, которой нельзя добиться с использованием только лишь ручного труда, экономию на плановых проверках оборудования, а также значительное снижение затрат на потери электроэнергии от работы установки в неоптимальном режиме. Все эти преимущества достигаются при достаточно небольших затратах на внедрение и адаптацию алгоритма под конкретную интеллектуальную станцию управления ШГНУ.

- Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 5. – С. 1–26.
- Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit / G. Guluyev, A. Pashayev, F. Pashayev, A. Rzayev, E. Sabziev // Problems of Cybernetics and Informatics (PCI): IV International Conference. – Baku, 2012. – P. 1–3.
- 10. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run / T. Lindh, J.-H. Montonen, M. Grachev, M. Niemelä // IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Riga, 2015. – P. 416–420.
- Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. The information processing of dynamometer cards at controllers of automation power drives sucker rod pumps // IEEE International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). - Perm, 2015. - P. 1-6.
- Привод штанговых глубинных насосов, Паспорт ПШГН.00.000.ПС. – Екатеринбург: Уралтрансмаш, 1991. – 34 с.
- Руководство по эксплуатации скважин штанговыми насосами. – Альметьевск: АО «Татнефть», 1992. – 440 с.
- Способ диагностирования уравновешенности станков-качалок штанговых насосных установок: пат. Рос. Федерация № 2227848; заявл. 31.10.2002; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12. – 8 с.
- Способ определения неуравновешенности станка-качалки скважинной штанговой насосной установки: пат. Рос. Федера-

ция № 2621435; заявл. 03.02.2016; опубл. 06.06.2017, Бюл. № 16.-6 с.

- Способ диагностирования уравновешенности привода штангового глубинного насоса: пат. Рос. Федерация № 2334897; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. 4 с.
- Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18. № 2 (63). С. 54–60.
- Зюзев А.М. Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2004. 347 с.
- Модели нагрузок для симуляторов реального времени электроприводов / А.М. Зюзев, М.В. Бубнов, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 24–30.
- The dynamic simulation model and the comprehensive simulation algorithm of the beam pumping system / S. Dong, Y. Cui, M. Xing, S. Liao, L. Du // International Conference on Mechanical and Automation Engineering (MAEE). – Jiujang, 2013. – P. 118–122.
- 21. Hands-on model of sucker rod pumping facility for oil well production / K.F. Fozao, M. Lissouck, F. Lontsi, A. Ngasa, N. Mban-

da // Journal of Petroleum and Gas Engineering. – 2015. – Né6~(4). – P. 45–53.

- Sucker-rod pumping system: Simulator and dynamic level control using bottom hole pressure / B. Ordonez, A. Codas, U.F. Moreno, A. Teixeira // Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – Hamburg, 2008. – P. 282–289.
- Fuyu W., Guoming C. The virtual experiment system of suckerrod pumping development and its application // Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE). - Wuhan, 2010. - V. 2. -P. 178-181.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Mudrov M.V. Sucker-Rod Pump Unit Electric Drive Simulator // 2<sup>™</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library // Journal of Physics: Conference Series. - 2018 - № 944. - P. 1-7.
- 26. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – С. 533–563.

Поступила 18.10.2018 г.

## Информация об авторах

Зюзев А.М., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

*Бубнов М.В.*, аспирант, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. UDC 622.276.53

## SUCKER-ROD PUMPING UNIT BALANCE DIAGNOSTICS BY WATTMETER CARD

## Anatoliy M. Zyuzev<sup>1</sup>,

a.m.zyuzev@urfu.ru

## Matvei V. Bubnov<sup>1</sup>,

m.v.bubnov@urfu.ru

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira Street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

**The relevance** of the research is conditioned by widespread use of unregulated sucker-rod pumping units, equipped only with mechanical adjustment tools. Application of that type of units results in considerable losses of both electricity and crude oil related to machine operating in non optimal regime. To solve this problem both new and already exploited sucker-rod pumping units are equipped with means of intelligent control and monitoring, which are included within control stations equipped with frequency converter and controller. Implementation of these tools on sucker-rod pumping units control station controller requires the development of appropriate algorithms to ensure autonomous, high performance, cost-effective and reliable function of plant during all life cycle.

**The main aim** of the research is elaboration of the algorithms for determining pumpjack balance, optimal counterbalance position and polished rod dead centres passing moment.

**Objects** of the research are the sucker-rod pumping unit in different operating modes and pumpjack balance, defined by the counterbalance position on the crank.

**Methods:** mathematical analysis tool of differential equations and transfer functions, computer simulation, comparison and analysis of charts and diagrams.

**Results.** The paper considers the existing ways of pumpjack balance detection and their shortcomings. It turns out that wattmetering is the most available and fail-safe sucker-rod pumping unit condition monitoring method which does not require installation of additional external sensors. The authors have developed the sucker-rod pumping unit computer model for investigating principles and load cycles of unit operation. Based on the data obtained by simulations the authors developed the algorithm of pumpjack balance detection, which can work as sucker-rod pumping unit intelligent control station software ensuring easy control, timely service and cost reduction.

#### Key words:

*Oil industry, sucker-rod pumping unit, pumpjack, induction motor, frequency converter, controller, intelligent control station, wattmeter card, balance ratio, counterweight, dead centre, diagnostics.* 

#### REFERENCES

- 1. Arbuzov V.N. *Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Exploitation of oil and gas wells]. P. 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2012. 272 p.
- Lavrushko P.N., Muraviev V.M. Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh skvazhin [Exploitation of oil and gas wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 367 p.
- Ivanovsky V.I., Darittsev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefti [Downhole pumping units for oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2002. 824 p.
- Liu X., Qi Y., Wu J., Yang L., Chen F. An approach to the optimum design of sucker-rod pumping system. WASE International Conference on Information Engineering (ICIE). Beidaihe, 2010. Vol. 3, pp. 140–143.
- Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption. *IEEE Int. Siberian Confe*rence on Control and Communications (SIBCON). Omsk, 2015. pp. 1–4.
- Bubnov M.V., Zyuzev A.M. Sredstva diagnostirovaniya oborudovaniya ustanovok shtangovykh glubinnykh nasosov [Sucker-rod pumping units equipment diagnosing facilities]. Trudy pervoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Uralskogo energeticheskogo instituta [Proc. of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Power Engineering Institute]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2016. pp. 175-178.
- Khakimyanov M.I., Svetlakova S.V., Guzeev B.V., Solovev Ya.Yu., Muzalev I.V. Sravnitelny analiz vozmozhnostey otechestvennykh i importnykh sistem avtomatizatsii skvazhin, ekspluatiruemykh ShGN [Comparative analysis of the capabilit-

ies of domestic and imported well automation systems operated by SRP]. *Neftegazovoe delo*, 2008, no. 2, pp. 1–22.

- 8. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Monitoring of sucker rod pump units on result of the analysis wattmeter cards. *Oil and gas industry*, 2011, no. 5, pp. 1–26. In Rus.
- Guluyev G., Pashayev A., Pashayev F., Rzayev A., Sabziev E. Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit. *Problems of Cybernetics and Informatics (PCI): IV International Conference*. Baku, 2012. pp. 1–3.
- Lindh T., Montonen J.-H., Grachev M., Niemelä M. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy* and Electrical Drives. Riga, 2015. pp. 416-420.
- Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. The information processing of dynamometer cards at controllers of automation power drives sucker rod pumps. *IEEE International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, 2015. pp. 1–6.
- Privod shtangovykh glubinnykh nasosov [Rod deep pumps actuator]. Passport PShGN.00.000.PS. Yekaterinburg, Uraltransmash Publ., 1991. 34 p.
- Rukovodstvo po ekspluatatsii skvazhin shtangovymi nasosami [Manual on operation of wells with sucker-rod pumps]. Almetyevsk, Tatneft Publ., 1992. 440 p.
- Goldshteyn E.I., Isachenko I.N., Polyakova S.V. Sposob diagnostirovaniya uravnoveshennosti stankov kachalok shtangovykh nasosnykh ustanovok [The method for diagnosing the balance of the pumpjack of rod pump units]. Patent RF, no. 2227848, 2004.
- 15. Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh. Sposob opredeleniya neuravnoveshennosti stanka kachalki skvazhinnoy shtangovoy nasosnoy

*ustanovki* [The method for determining the unbalance of a pumpjack of a borehole rod pump unit]. Patent RF, no. 2621435, 2017.

- Ushakov V.S., Demyanenko N.A. Sposob diagnostirovaniya uravnoveshennosti privoda shtangovogo glubinnogo nasosa [The method for diagnosing the balance of a rod depth pump acuator]. Patent RF, no. 2334897, 2008.
- Khakimyanov M.I. Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units. Vestnik UGATU, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 54-60. In Rus.
- Zyuzev A.M. Razvitie teorii i obobshchenie opyta razrabotki avtomatizirovannyh ehlektroprivodov agregatov neftegazovogo kompleksa. Dis. Dokt. nauk [Development of the theory and generalization of experience in the development of automated electric drives for oil and gas units. Dr. Diss.]. Yekaterinburg, 2004. 347 p.
- Ziuzev A.M., Bubnov M.V., Mudrov M.V., Nesterov K.E. Load models for real-time simulators of electric drives. *Automation in* the Electric Power Industry and Electrical Engineering, 2016, vol. 1, pp. 24-30. In Rus.
- Dong S., Cui Y., Xing M., Liao S., Du L. The dynamic simulation model and the comprehensive simulation algorithm of the beam pumping system. *International Conference on Mechanical and Automation Engineering (MAEE)*. Jiujang, 2013. pp. 118–122.
- Fozao K.F., Lissouck M., Lontsi F., Ngasa A., Mbanda N. Handson model of sucker rod pumping facility for oil well production.

Journal of Petroleum and Gas Engineering, 2015, no. 6 (4), pp. 45-53.

- Ordonez B., Codas A., Moreno U.F., Teixeira A. Sucker-rod pumping system: Simulator and dynamic level control using bottom hole pressure. *Emerging Technologies and Factory Automation* (*ETFA*). Hamburg, 2008. pp. 282-289.
- Fuyu W., Guoming C. The virtual experiment system of suckerrod pumping development and its application. *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*, Wuhan, 2010, vol. 2, pp. 178-181.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Mudrov M.V. Sucker-Rod Pump Unit Electric Drive Simulator. 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, 2016. pp. 1–4.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library. *Journal* of *Physics: Conference Series*, 2018, no. 944, pp. 1–7.
- 26. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oilwells on energy consumption sucker rod pumps. *Oil and gas industry*, 2015, no. 1, pp. 533-563. In Rus.

Received: 18 October 2018.

## Information about the authors

Anatoliy M. Zyuzev, Dr. Sc., professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

*Matvei V. Bubnov*, graduate student, engineer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ РУДЫ В ПОЛОГИХ МАЛОМОЩНЫХ ЗАЛЕЖАХ

## Лукьянов Виктор Григорьевич<sup>1</sup>,

lukyanov@tpu.ru

## Голик Владимир Иванович<sup>2,3</sup>,

v.i.golik@mail.ru

## Комащенко Виталий Иванович4,

komashchenko@inbox.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет, Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.
- <sup>3</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.
- <sup>4</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85.

**Актуальность** исследования объясняется тем, что большинство руд цветных, благородных и редких металлов добывается в сложных условиях, где применение высокопроизводительной техники невозможно. Выбор варианта отработки таких рудных тел осуществляется в результате компромисса между производительностью добычи и качеством добываемой руды. Эффективнее других сплошная отбойка руд уступами по руде. Другие варианты являются более затратными по причине проходки специальных выработок для обойки руды.

**Целью** исследования является доказательство того, что альтернативные варианты добычи руды в тех же условиях могут конкурировать с базовым вариантом по показателям производительности и качества, будучи значительно более безопасными, исключая нахождение работающих в открытом выработанном пространстве.

**Основным методом** исследования является моделирование показателей отработки в экспериментальных блоках при соблюдении условий на конкретном месторождении. Полученные показатели систематизируются и интерпретируются графически.

**Результаты**. Приведены результаты моделирования вариантов сплошной системы разработки: вариант с отбойкой руды уступами из очистного пространства сравнивается с вариантом с отбойкой руды из буровых выработок: подэтажных штреков и восстающих. Установлены количественные показатели альтернативных вариантов. Определено, что трудоемкость проходки буровых выработок компенсируется удобством доставки руды и относительной безопасностью работ. Доказано, что варианты сплошной и камерно-столбовой систем разработки, использующие фактор бурения в рудном массиве из специальных выработок и отбойки руд направленным действием взрыва, экономически целесообразнее и безопаснее.

**Выводы.** При мало различающихся показателях сравниваемых вариантов увеличивающаяся трудоемкость проходки специальных буровых выработок для отбойки руды компенсируется снижением затрат на доставку руд при создании рудного вала использованием направленного действия взрыва.

#### Ключевые слова:

Руда, разработка, производительность труда, отбойка, уступы по руде, бурение, штреки, восстающие.

## Введение

Совершенствование техники и технологии подземной разработки месторождений полезных ископаемых не сопровождается улучшением техникоэкономических показателей освоения недр [1–4].

Это в большей степени относится к пологим рудным телам месторождений руд редких, благородных и цветных металлов мощностью от 0,6-0,8 до 15 м с углом падения до 25°.

Потери и разубоживание руды при добыче таких руд составляют 25-35 %, а небольшая высота очистного пространства не позволяет применять производительную технику.

Совершенствование технологий разработки маломощных месторождений основывается на компромиссе геологических, горнотехнических и гео-

механических факторов, в первую очередь, погашения выработанного пространства [5-8].

Считается, что опасность обрушения пород кровли для работающих и увеличения разубоживания руд снижается установкой временной крепи. Но практикой доказано, что такая крепь при механическом воздействии повреждается.

Поэтому преимущественное распространение получают «безлюдные» варианты сплошной и камерно-столбовой систем разработки, использующие фактор обуривания рудного массива из специальных выработок и отбойки руд направленным действием взрыва.

Если «безлюдные» варианты камерно-столбовой системы разработки пользуются безусловным приоритетом над сплошными вариантами, то выбор

между вариантами камерно-столбовой системы разработки неоднозначен, что является темой исследований, в том числе целью настоящей статьи [9–11].

Преимущества «безлюдные» вариантов сомнений не вызывают, поэтому критерием оптимальности варианта становятся прочие принятые в горной практике показатели [12–16].

#### Полученные результаты

Выбор оптимального варианта системы разработки производится в ходе промышленного эксперимента при отработке месторождения в Северном Казахстане. Поскольку рассматриваемые варианты радикально различаются способом отделения от массива и дробления руд, этот признак принимается генеральным при сравнении вариантов по технико-экономическим показателям.

Сравниваемыми вариантами отработано по три блока в равных условиях одного и того же рудного поля. Базовым принят вариант сплошной системы разработки с отбойкой руды уступами из очистного пространства, при котором рабочие находятся в открытом выработанном пространстве, а отбитая в уступах руда разбрасывается взрывом в его пределах.

Бурение и доставка отбитой руды по такой схеме осуществляется в опасных для работающих условиях. Отбитая руда взрывом разбрасывается в открытом выработанном пространстве, снижая производительность труда при доставке.

Альтернативными являются варианты с отбойкой руды из буровых выработок. При обойке руды из подэтажных штреков и из буровых выработок работающие находятся в выработках малого сечения, а отбитая руда за счет рациональной схемы расположения шпуров располагается на ограниченной площади.

Вариант сплошной выемки с отбойкой руды из буровых восстающих характеризуется следующими данными. Блоки размерами 40–50 м по падению и простиранию подготавливаются штреками для скреперования и вентиляции и восстающими. Из восстающего через 8 м пройдены подэтажные штреки высотой 1,5 м и высотой 2,5 м, которые делят блок по восстанию на панели. У границы блока подэтажные штреки соединяются сбойками для образования отрезной щели.

Шпуры для отбойки панелей бурят из поэтажных штреков. В открытом выработанном пространстве создается «рудный вал», препятствующий разлету руды в выработанном пространстве. Высота вала определяется мощностью рудного тела. Забой панели имеет клиновидную форму, что обеспечивает отброс руды в компенсационное пространство.

Ширина целика зависит от средств бурения. Чаще отбойка осуществляется за один прием шпурами длиной 3 м с обеих сторон. Реже обивают в два приема.

Взрывание шпуров в панелях производятся одновременно, причем прямая линия забоя панелей по падению улучшает условия образования рудного вала. Рудный вал пополняется со стороны забоя при отбойке панелей, а отбитая руда убирается со стороны выработанного пространства.

Процессы бурения и доставки совмещаются, что создает условия для более производительной отработки блока.

Нарезные выработки в исследуемых блоках имели размеры 4,0-5,0 м<sup>2</sup>. Высота штреков 1,7 м при мощности рудного тела 1-1,5 м обеспечивалась с прихватом 0,4-0,8 м пород.

Отбойка целиков производилась в два приема: сначала бурили шпуры длиной 1,8 м из подэтажных буровых штреков вверх и вниз. После их взрывания оставшаяся часть целика разбуривалась и отбивалась только снизу.

Прихват вмещающих пород по очистным работам в опытных блоках составил 0,26–0,40 м, причем с уменьшением мощности руд он увеличивался.

Из штрека скреперования по середине панели проходят буровые восстающие до вентиляционного штрека. Нарезка панелей производится так, чтобы одна панель была в отработке, а вторая готовилась к отработке. Ширина целиков между буровыми восстающими 6 м, высота восстающих 1,7 м, ширина 3 м.

Отработка панелей производится путем бурения и взрывания шпуровых зарядов в обе стороны из бурового восстающего. Целик между восстающими отбивается в два приема шпурами глубиной 3,0 м. Первая половина целика отбивается из одного бурового восстающего, а оставшаяся – из другого. При отбойке шпурами глубиной 1,8 м забой имеет уступную форму.

Шпуры бурят с разворотом по падению, что обеспечивает направленную отбойку на буровой восстающий. Зачистка блока производится после отработки каждой панели.

Таблица 1. Показатели варианта сплошной выемки с отбойкой руды из подэтажных штреков

 Table 1.
 Indicators of an option of solid groove with ore breaking from the sublevel drifts

Блок Block	Вид работ Type of work	0бъем, м <sup>³</sup> Volume, m <sup>³</sup>	Площадь, м Аrea, m	Moщность рудная, м Ore thickness, m	Pазубоживание, % Dilution, %	Производительность забойщика, м <sup>3</sup> /см Miner productivity, m <sup>3</sup> /сm
1	Отбойка целика Solid breaking	1300	1000	1,1	15	3,5
	Проходка штреков Sinking of drifts	1000	600	1,1	33	3,9
	Bcero/Total	2300	1600	1,1	22	3,7
2	Отбойка целика Solid breaking	3300	1800	1,6	13	4,4
	Проходка штреков Sinking of drifts	1300	800	1,4	21	4,6
	Bcero/Total	4600	2600	1,5	15	4,5
3	Отбойка целика \Solid breaking	2200	2200	0,7	27	3,4
	Проходка штреков Sinking of drifts	900	500	0,9	46	2,8
	Bcero/Total	3100	2700	0,7	35	3,0

В табл. 1, 2 приведены технико-экономические показатели отработки маломощных полозго- и наклонно-падающих рудных тел сплошной системой разработки с отбойкой пуды из очистного пространства уступами и из буровых выработок – подэтажных штреков и буровых восстающих.

Таблица 2.	Показатели	варианта	выемки	С	отбойкой	руды	из
	буровых восси						

 
 Table 2.
 Indicators of excavation option with ore breaking from the drilling raise

Блок Block	Вид работ Type of work	Объем, м <sup>3</sup> Volume, m <sup>3</sup>	Площадь, м Аrea, m	Moщность рудная, м Ore thickness, m	Paзубоживание, % Dilution, %	Производительност забойщика, м <sup>3</sup> /см Miner productivity, m <sup>3</sup> /сm	
1	Отбойка целика Solid breaking	1000	700	1,2	18	3,1	
	Проходка восстающих Raise boring	600	300	1,1	32	3,4	
	Bcero/Total	1600	1000	1,2	22	4,2	
2	Отбойка целика Solid breaking	700	800	0,5	40	4,9	
	Проходка восстающих Raise boring	1300	800	0,7	52	4,6	
	Bcero/Total	2000	1600	1,2	22	4,9	
3	Отбойка целика Solid breaking	1300	1600	0,6	30	3,0	
	Проходка восстающих Raise boring	1800	800	0,6	65	3,4	
	Bcero/Total	3100	2400	0,6	49	3,0	

Из сравнения вариантов сплошной выемки с отбойкой руды из подэтажных штреков и восстающих следует, что в диапазоне сравниваемых мощностей рудного тела отбойка из подэтажных штреков имеет лучшие показатели, чем отбойка из восстающих (табл. 3).

 Таблица 3.
 Сопоставимые показатели вариантов отбойки руды

 Table 3.
 Comparable indicators of ore breaking options

Вариант отбойки Breaking option	Блоки Blocks	Vroл падения, градус Incidence angle, degree	Размеры, м Size, m	Moщность рудная, м Ore thickness, m	Доля нарезных работ, % Share of rifled works, %	Разубоживание, % Dilution, %	Производительность забойщика, м <sup>3</sup> /см Miner productivity, m <sup>3</sup> /сm
77	1	12	40×40	1,1	45	22	3,7
Из подэтажных	2	30	$45 \times 55$	1,5	28	15	4,5
штреков From cublevel	3	30	$50 \times 55$	0,7	40	35	4,4
drifts	Среднее Average	-	-	1,1	37	23	3,7
	1	10	$45 \times 35$	0,7	47	47	4,7
Un pogemorowww	2	15	$40 \times 25$	1,2	32	22	3,2
From raise	3	30	$55 \times 50$	0,6	34	49	3,2
	Среднее Average	-	-	0,7	38	42	3,8
Из очистного пространства From extraction space	Среднее Average	_	_	1,0	50	41	3,7

По показателю «Производительность труда забойщика» сравниваемые варианты отбойки близки, что объясняется превалированием доли бурения в трудозатратах (рис. 1).



Рис. 1. Производительность труда при альтернативных вариантах отбойки руд: 1 – из подэтажных штреков; 2 – из буровых восстающих; 3 – уступами

Fig. 1. Productivity at alternative ore blasting: 1 – from sublevel drifts; 2 – drilling raise; 3 – terraces

Разубоживание при отбойке из буровых выработок в целом существенно меньше, чем при отбойке уступами из очистного пространства, что связано с уменьшением площади бурения (рис. 2).



Рис. 2. Разубоживание при альтернативных вариантах отбойки руд: 1 – из подэтажных штреков; 2 – из буровых восстающих; 3 – уступами

Fig. 2. Dilution at alternative blasting ore: 1 – from sublevel drifts; 2 – drilling raise; 3 – terraces

Анализом вариантов отбойки руды при разработке пологих месторождений руд редких, благородных и цветных металлов малой мощности доказано, что способы с отбойкой из буровых выработок не только эффективнее по показателям производительности труда и качества руд, но устраняют необходимость нахождения работающих в открытом выработанном пространстве, что позволяет им конкурировать с базовым вариантом.

Полученные результаты корреспондируют с результатами отечественной и зарубежной практики [17–20].

## Выводы

- 1. По критерию производительности труда забойщика сравниваемые варианты отбойки руды имеют практически одинаковые показатели, что говорит о превалирующей роли взрывной отбойки по сравнению с процессами доставки, крепления и др.
- Несмотря на повышенную трудоемкость проходки буровых выработок, производительность в целом не уменьшается, потому что затраты на

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Лукьянов В.Г. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 33–40.
- Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, I. Gaponenko // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - V. 7. - № 7. - P. 383-387.
- Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – Путь длиной в 65 лет // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 6–12.
- Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology / Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye // Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 77–83.
- Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 1. – С. 10–15.
- Калмыков В.Н., Петрова О.В., Мамбетова Ю.Д. Обоснование параметров технологических резервов устойчивого функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 5–16.
- Белоусов А.С., Алексеев О.Н. Технологические схемы подготовки отработки мало- мощных урановых пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 9. – С. 94–102
- Васильев П.В., Стась Г.В., Смирнова Е.В. Оценка риска травматизма при добыче полезных ископаемых // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016. – Вып. 2. – С. 39–45.
- Выбор оптимального варианта комбинированной системы разработки месторождения высокоценного кварца на основе моделирования / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 114–124.
- 10. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations

проходку компенсируются удобством доставки при оборудовании рудного вала.

- По критерию разубоживания альтернативные варианты превосходят базовый за счет создания более комфортных условий для работы взрыва.
- При в целом мало различающихся показателях сравниваемых вариантов отбойка из буровых штреков и восстающих избавляет от опасного нахождения работающих в открытом выработанном пространстве.

using a neuro-fuzzy system // Applied Soft Computing Journal. – 2015. – V. 32. – P. 1–12.

- 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China / G. Wang, R. Li, E.J.M. Carranza, F. Yang // Ore Geology Reviews. - 2015. - V. 71. -P. 592-610.
- King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-tounderground mining transition // European Journal of Operational Research. – 2017. – V. 257. – Iss. 1. – P. 297–309.
- Yao Y., Cui Z., Wu R. Development and Challenges on Mining Backfi ll Technology // Journal of Material Science Research. – 2012. – V. 1. – Iss. 4. – P. 73–78.
- Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore benefication codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 17. – P. 38105–38109.
- 15. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало- и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико- химических геотехнологий // Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 93–97.
- Golik V.I., Razorenov Yu.I., Ignatov V.N., Kasheva Z.M. The history of Russian Caucasus ore deposit development // The social sciences (Pakistan). 2016. T. 11. № 15. P. 3742–3746.
- Calculation and Management for Mining Loss and Dilution under 3D Visualization Technical Condition / Weijing Wang, Shaofeng Huang, Xiaobo Wu, Qingfei Ma // Journal of Software Engineering and Applications. – 2011. – V. 4. – P. 329–334.
- Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. – Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.
- Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both / E. Ben-Awuah, O. Richter, T. Elkington, Y. Pourrahimian // International Journal of Mining Science and Technology. - 2016. - V. 26. - Iss. 6. - P. 1065-1071.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - V. 7. - № 10. -P. 213-217.

Поступила 27.10.2018 г.

## Информация об авторах

**Лукьянов В.Г.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Голик В.И.*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета; главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра.

*Комащенко В.И.*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

## EFFICIENCY OF ORE BLASTING IN SLOPING LOW-YIELD DEPOSITS

Victor G. Lukyanov<sup>1</sup>,

lukyanov@tpu.ru

## Vladimir I. Golik<sup>2,3</sup>,

v.i.golik@mail.ru

## Vitaly I. Komashchenko<sup>4</sup>,

komashchenko@inbox.ru

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> North Caucasus State Technological University, 44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.
- <sup>3</sup> Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center, 93A, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.
- <sup>4</sup> Belgorod State National Research University, 85, Pobedy street, Belgorod, 308015, Russia.

**The relevance** of the study is explained by the fact that most of the base metal, noble metal and rare metal ores are extracted in difficult conditions, where the use of high-performance equipment is impossible. The alternative mining of that sort of ore bodies is chosen as a result of a compromise between extraction rating and quality of the produced ore. It is considered, that the longwall ore breaking in form of pit bank is the most effective one. Other options are considered as cost-intensive because of special drifting for ore breaking. **The aim** of the study is to prove, that the alternative options of ore production under the same conditions can compete with the main option upon performance and quality indicators, being much safer, excluding the presence of people in work in the mined-out area. **The main method** of the research is modeling of mining indexes in experimental blocks when conditions in a specific deposit are met. The obtained indicators are systematized and interpreted graphically.

**Results.** The paper introduces the results of modeling the options of the heading system: the option of the bank ore breaking in the stopping zone is compared with the one of the ore breaking from the drilling room: sublevel drifts and risings. The authors have determined the quantitative indicators of alternative options. It is determined that the labour intensity of the drilling room sinking is compensated by the convenience of ore delivery and relative operating safety. It is proved that the options of the heading and room-and-pillar systems, using the drilling factor in the solid ore in special pits and ore breaking by the direct action of the explosion are economically sounder and safer. **Conclusions.** With little difference in the parameters of the compared options, the increasing labour intensity sinking of the special drilling rooms for ore breaking is compensated by cost saving in ore delivery when the ore bar is created using the direct action of the explosion.

#### Key words:

Ore, development, duty of labour, breaking, banks on ore, drilling, drifts, risings.

## REFERENCES

- Komashchenko V.I., Vorobyov E.D., Lukyanov V.G. Development of blasting technology that reduces harmful impact on the environment. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 33-40. In Rus.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Gaponenko I. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 7, pp. 383–387.
- Dmytrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC «Leading design and exploration and research institute of industrial technology» – a path length of 65 years. *Mountain magazine*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
- Haifeng Wang, Yaqun He, Chenlong Duan, Yuemin Zhao, Youjun Tao, Cuiling Ye. Development of Mineral Processing Engineering Education in China University of Mining and Technology. Advances in Computer Science and Engineering. AISC 141. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2012. pp. 77–83.
- Lyashenko V.I. Environmental protection technologies for the development of complex structures of mineral deposits. *Marksheydersky vestnik*, 2015, no. 1, pp. 10–15. In Rus.

- Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Yu.D. Justification of the parameters of technological reserves for the sustainable operation of the mining and mining system in the underground mining of copper-pyrite deposits. *Mining Information Analytical Bulletin*, 2017, no. 8, pp. 5–16. In Rus.
- 7. Belousov A.S., Alekseev O.N. Technological schemes for preparation of mining of low-power uranium strata. *Mining information analytical bulletin*, 2017, no. 9, pp. 94–102. In Rus.
- 8. Vasiliev P.V., Stas G.V., Smirnova E.V. Assessment of the risk of injury during mining operations. *Izvestiya Tula State University*. *Earth sciences*, 2016, Iss. 2, pp. 39–45. In Rus.
- Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Selection of the optimal variant of the combined system for the development of a deposit of high-grade quartz on the basis of modeling. *Physico-technical problems of the development of useful deposits fossils*, 2016, no. 6, pp. 114–124. In Rus.
- Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. *Applied Soft Computing Journal*, 2015, vol. 32, pp. 1–12.

- Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. Ore Geology Reviews, 2015, vol. 71, pp. 592–610.
- King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-tounderground mining transition. *European Journal of Operatio*nal Research, 2017, vol. 257, Iss. 1, pp. 297-309.
- Yao Y., Cui Z., Wu R. Development and Challenges on Mining Backfi ll Technology. *Journal of Material Science Research*, 2012, vol. 1, Iss. 4, pp. 73–78.
- Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore benefication codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105–38109.
- Golik V.I. Konceptualnye podhody k sozdaniyu malo- i bezotkhodnogo gornorudnogo proizvodstva na osnove kombinirovaniya fiziko-tekhnicheskikh i fiziko-khimicheskikh geotekhnologiy [Conceptual approaches to development of small and non-waste mining production on the basis of combining physical, technical and physicochemical geotechnologies]. *Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 93–97.

- Golik V.I, Razorenov Yu.I, Ignatov V.N., Kasheva Z.M. The history of Russian Caucasus ore deposit development. *The social sciences (Pakistan)*, 2016, vol. 11, no. 15, pp. 3742–3746.
- Weijing Wang, Shaofeng Huang, Xiaobo Wu, Qingfei Ma. Calculation and Management for Mining Loss and Dilution under 3D Visualization Technical Condition. *Journal of Software Engine*ering and Applications, 2011, vol. 4, pp. 329-334.
- Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Englewood, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
- Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, vol. 26, Iss. 6, pp. 1065–1071.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 213–217.

Received: 27 October 2018.

## Information about the authors

Victor G. Lukyanov, Dr. Sc., professor, professor-consultant, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vladimir I. Golik*, Dr. Sc., professor, professor, North Caucasus State Technological University; chief researcher, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center.

Vitaly I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, professor, Belgorod State National Research University.

УДК 551.341:551.343.7

# ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ГОРИЗОНТАМИ ПОЧВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГЛУБИННЫХ СКВАЖИН

Ботыгин Игорь Александрович<sup>1</sup>,

bia@tpu.ru

Крутиков Владимир Алексеевич<sup>2</sup>,

sherstneva@tpu.ru

Шерстенева Анна Игоревна<sup>1</sup>,

sherstneva@tpu.ru

## Демешко Мария Владимировна<sup>1</sup>,

demeshkomaria@gmail.com

## Канаева Ирина Александровна<sup>1</sup>,

irk-2009@yandex.ru

## Солтаганов Николай Андреевич<sup>1</sup>,

nasoltaganov@yandex.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехничесий университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, Академический пр., 10/3.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения геологических объектов путем прямых геофизических измерений их параметров и применения полученных данных и результатов математической обработки для решения задач рационального природопользования. Эффективное решение этих задач особенно важно при исследовании влияния метеорологических параметров на водно-тепловой режим горных пород в районах с глубоким сезонным промерзанием.

**Цель:** разработать и провести испытания геофизического комплекса для определения пространственного распределения температуры в грунте, динамики изменения этого распределения во времени и корреляционные соотношения его промерзания на различных горизонтах в условиях Сибири и Крайнего Севера.

**Объекты:** федеральная автомобильная дорога «Сургут-Салехард» в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа и дорога территориального значения «Коротчаево-Уренгой».

**Методы:** методы анализа статистических данных для изучения взаимосвязей между значениями переменных, включая исследование статистической взаимосвязи двух или более случайных величин (корреляционный анализ), методы функционального анализа для исследования статистических данных в частотно-временном диапазоне (вейвлет-преобразование).

**Результаты.** Показано, что с увеличением глубины грунта, график значений температур промерзания принимает более плоский характер и с увеличением удаленности между горизонтами наблюдений уменьшается температурная корреляционная связь между ними. В частности, в слоях грунта 1,9–2,1 м значения коэффициентов температурной корреляции практически не изменяются на всех временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,9–1,2 м, 1,2–1,5 м, 1,5–1,8 м на средних временных масштабах выборки наблюдается незначительное изменение коэффициентов температурной корреляции, а максимальное отклонение коэффициентов корреляции наблюдается на больших временных масштабах выборки в слоях грунта 0,9–1,2 м, 1,2–1,5 м, 1,5–1,8 м на средних временных масштабах выборки наблюдается незначительное изменение коэффициентов температурной корреляции, а максимальное отклонение коэффициентов корреляции наблюдается на больших временных масштабах выборки. В слоях грунта больших временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,3–1,2 м, 0,3–2,1 м, 0,3–2,1 м, 0,3–2,1 м, 0,3–2,1 м на средних временных масштабах выборки наблюдается на больших временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,3–2,1 м, 0,3–2,1 м, 0,3–1,8 м, 0,6–2,1 м на средних временных масштабах выборки наблюдается на больших временных масштабах выборки. В слоях грунта 0,3–2,1 м, 0,3–1,8 м, 0,6–2,1 м на средних временных масштабах выборки наблюдается значительное отклонение коэффициентов температурной корреляции, а максимальное отклонение коэффициентов температурной корреляции также наблюдается на больших масштабах выборки. На базе полученных температурных рядов были построены спектрограммы вейвлет-преобразований для классических базисных вейвлетов (вейвлет Морле, DOG-вейвлет, вейвлет Пауля), косвенно демонстрирующие волнообразное «продвижение» фронта (фазы) холода в грунте.

#### Ключевые слова:

Геологическая среда, корреляционный анализ, рациональное природопользование, вейвлет-преобразование, метод малоглубинных скважин, геофизическое исследование, термический режим горных пород,

#### Введение

Актуальность исследования геофизических пространственных данных очень важна в практической геологии и, особенно, в инженерном геофизическом исследовании для прогноза и мониторинга состояния геологической среды изучаемой территории. Одним из способов получения таких знаний является применение геостатистических методов, базирующихся на общирной номенклатуре аппаратно-программных средств при проведении инженерно-геодезических и инженерно-геологических работ. Наблюдения при геофизическом исследовании различных участков таких объектов позволяют получить не только знания о структуре геологического разреза, но и определить физические характеристики грунта, необходимые при проектировании инженерных сооружений.

Стоит отметить, что решением Правительства Российской Федерации «специализированное

прогнозно-минерагеническое, геолого-геофизическое и геолого-геохимическое изучение приоритетных территорий для создания поискового задела» объявлено одним из важнейших направлений региональных и тематических геологических исследований в период до 2035 г., а также что первичная и интерпретированная геологическая информация, полученная при выполнении полевых работ, является одним из важнейших компонентов в едином фонде геологической информации о недрах [1].

Одним из важных подходов исследования пород является изучение их водно-теплового режима как определяющего фактора, особенно для многих почвенно-климатических явлений [2-4]. Здесь необходимо отметить, что именно российские ученые еще в конце XIX - начале XX вв. заложили основы современной концепции «почвенного климата», объясняющей глобальную эколого-климатообразующую роль почвенного покрова. Даже беглый взгляд на интернет-версии исторических музеев основных российских университетов позволяет однозначно в этом убедиться. Это и В.В. Докучаев, обосновавший научный подход к почвоведению и географии почв и открывший основные закономерности генезиса и распространения почв. Это и П.А. Костычев, создавший и развивший школу агрономического почвоведения. Это и Н.М. Сибирцев, предложивший генетическую классификацию почв. Это и М.М. Филатов, сформировавший основы физикотехнического представления о грунтах и выдвинувший оригинальную теорию микроструктуры грунтов, и многие другие отечественные ученые.

В отечественных публикациях, связанных с исследованиями температурных режимов почв, обсуждаются различные аспекты их функционирования. Оцениваются изменения температурного режима среднетаежных подзолистых почв [5]. Обсуждаются температурные режимы сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов [6]. В [7] приведены исследования температурного режима почв северной тайги Западной Сибири, в [8] - Европейской Субарктики (северной окраины Европейского субконтинента), а в [9] рассматривается термический режим почвы пяти хвойных сообществ подзоны средней тайги. Характеристика динамики температуры лугово-черноземной солонцеватой почвы аласной котловины в Центральной Якутии приведена в [10]. Исследуется влияние температуры на минерализацию и гумификацию лесного опада [11]. В [12] исследован температурный режим торфяной почвы в мохово-травяной экосистеме Бакчарского болотного массива, расположенного в южнотаежной зоне Западной Сибири. Результаты изучения температурного прогрева лесных почв в зоне Черноморского побережья Кавказа приведены в [13]. В работе [14] исследуется влияние климата на режимы и свойства почв Прикаспийской равнины и черноземов центрально-европейских и южных регионов России. Исчерпывающее исследование температурного режима комплексного почвенного покрова на полевом материале приведено в монографии [15].

Обширные научные исследования, связанные с различными аспектами влияния температурновлажностного режима на почву, проводятся и за рубежом. Так, в [16] приведены результаты шестилетних исследований, показывающие, что сезонный температурный градиент в тибетских альпийских экосистемах выше, чем во многих аналогичных экосистемах, и в среднем по Земле. И это необходимо учитывать в моделях ключевых экосистемных процессов, которые выделяют углерод из почвы в виде двуокиси углерода.

Исследования, обобщающие трехлетний период наземных наблюдений в Северной Америке [17], выявили нелинейные отношения во времени температуры воздуха и температуры почвы. В частности, приземные температуры воздуха показали большую изменчивость, чем температуры почвы верхнего слоя.

В [18] исследуется влияние температуры на растворение карбоната (солей угольной кислоты) в почвенно-грунтовых системах. Показано, что годовая температура поверхности и содержание воды в почве являются ключевыми параметрами для оценки воспроизведения в почве концентрации углекислого газа.

Исследование изменения температуры почвы на разных глубинах при добавлении постороннего органического вещества (древесного угля из бамбука и рисовой соломы) приведено в [19]. Отмечено демпфирующее действие органических веществ на изменение температуры почвы во времени (уменьшены различия между дневными и ночными температурами), что положительно повлияло на урожайность риса.

В работе [20] определялись и оценивались факторы, контролирующие температурную чувствительность органического вещества почвы в бореальных лесах. Показано, что метаболические способности почвенных микробных сообществ и содержание питательных веществ в почве являются определяющими для температурного изменения таежных почв.

Влияние температуры и корневых добавок на почвенную углеродную и азотную минерализацию, преимущественно в вечномерзлых торфяниках Северо-Восточного Китая, исследовано в [21]. Отмечено, что потепление истощает содержание углерода и стимулирует разложение сложных углеродосодержащих компонентов в органической части торфяников.

В [22] исследован температурный отклик минерализации почвенными органическими веществами в восьми арктических почвенных профилях Норвегии и России. Температурный отклик исследовали по двум параметрам, полученным из простой экспоненциальной модели, – интенсивность минерализации и температурный коэффициент (Q10).

Влияние вулканической тефры и валунов на температуру почвы приведено в [23]. В [24] исследовалась взаимосвязь между температурой почвы и содержанием почвенной воды на склоне. Мониторинг содержания почвенной воды имеет решающее значение для прогнозирования катастрофических сбоев на склоне. Температура почвы и объемное содержание воды на склоне были измерены во время контролируемых экспериментов с осадками. Показано, что для многих участков отбора проб после начала осаждения вместе с объемным содержанием воды повышалась и температура почвы.

В [25] исследовалось влияние температурновлажностного режима на тепловые свойства ветровых (эоловых) отложений в Южной Африке. Фиксировались такие показатели, как объемная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент диффузии. Выделены три комбинации температуры и содержания влаги, оказывающие значительное влияние на тепловые свойства. Это смачивание сухой почвы с повышением температуры, эффект замораживания и оттаивания, чрезмерное смачивание почв с повышением температуры.

Исследование пространственного распределения температуры почвы, почвенной воды и корней растений в капельно-орошаемом поле с использованием пластиковой мульчи рассмотрено в [26]. Приведены результаты трех полевых экспериментов с различными режимами ирригационной обработки. А в [27] приведены результаты трехлетнего полевого эксперимента по сравнительному исследованию этих же параметров почвы с применением биоразлагаемой пленки для мульчирования. Доказывается эффективность подхода при выращивании озимого рапса.

В статье [28] описано исследование изменения температуры замороженного грунта, вызванного ослаблением связей между льдом и частицами почвы из-за повышения температуры при динамической нагрузке. На базе экспериментов на установке для тестирования динамического напряжения (Split-Hopkinson pressure bar) получены кривые напряжения-деформации мерзлого грунта в разных условиях динамического нагружения.

Работа [29] посвящена применению метода микроградиентного грунтового разреза для расчета потоков энергии атмосферы и почвы в городских районах и пространственного изменения температуры поверхностного слоя грунта, прилегающего к сооружениям и зданиям.

Теоретико-модельное исследование связи основных метеорологических параметров с температурой почвы на разных глубинах приведено в [30]. Для прогнозирования температуры использовались искусственные нейронные сети, вейвлет-нейронные сети и генетические алгоритмы. Оценка эффективности этих подходов осуществлялась с использованием коэффициентов корреляции, средней абсолютной ошибки, среднеквадратичной ошибки и информационного критерия Акаике. Кроме того, для оценки сходства наблюдаемых и прогнозируемых значений температур почвы использовались диаграммы Тейлора. Результаты модельных исследований влияния температуры на гидравлические свойства грунта с учетом теплового эффекта от поверхностных свойств водных растворов (воды) и характеристик частиц почвы приведены и в [31]. Численное же определение вертикального потока воды на основе температурных профилей почвы описывается в [32]. Использованы две числовые модели, базирующиеся на уравнении конвекции теплопроводности, для расчета распределения температуры в почве и ее изменения во времени.

И завершим обзор ссылкой на перспективный подход применения локальных распределенных измерительных датчиков на базе волоконно-оптических систем (DTS) для измерений параметров грунта [33]. В первой части указанного исследования представлена концепция и принципы комбинационного рассеяния света (эффект Рамана), на которых базируются DTS-системы, компоненты системы DTS, методы измерений, калибровка, интерпретация данных, оценка точности метода DTS для почвоведения. Вторая часть посвящена обсуждению применения DTS-систем для измерения температуры почвы, ее тепловых свойств и влажности. В третьей части рассматриваются ограничения и перспективы применения DTS-систем для дальнейших исследований.

Приведенный выше краткий обзор еще раз подтверждает, что протекание всех почвенно-грунтовых процессов в значительной мере определяется изменением их водно-температурных режимов. В частности, очень актуальна задача исследования температурно-влажностного режима в грунте земляного полотна автомобильных трасс, проложенных в природно-климатических зонах Сибири [34]. Необходимо отметить, исследование геокриологических условий грунта – сложная научная задача, связанная с исследованием химико-минералогических, химико-гранулометрических, а также структурно-текстурных особенностей состава компонентов грунта. При этом очень важно получить и количественные оценки влажностного и температурного состояния грунта, необходимые для построения модели передачи тепла в грунте. Для правильного учета транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных трасс очень важны и данные пространственного распределения температуры в грунте, и динамика изменения этого распределения во времени.

## Схема экспериментальных наблюдений

В настоящей работе приведены результаты исследования динамики изменения температуры земляного полотна на федеральной автомобильной дороге «Сургут-Салехард» в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа и на дороге территориального значения «Коротчаево-Уренгой». Осуществлялось вертикальное температурное профилирование с использованием метода малоглубинного скважирования. Исследовалось изменение хода температуры на разных горизонтах и в раз-



Рис. 1. Схема малоглубинной скважины (1 – дорожная одежда; 2 – шурф; 3 – скважина)

Fig. 1. Scheme of the shallow well (1 is the pavement, 2 is the pier, 3 is the well)

ных пунктах наблюдений экспериментального участка. Наблюдения проводились на 10 постах в период с 15 октября 2006 г. по 24 января 2007 г. Количество датчиков в гирлянде – 7. Расстояние между температурными датчиками в гирлянде – 30 см. В поперечном сечении земляного полотна гирлянды были размещены вертикально у кромки проезжей части. Первый датчик устанавливался на глубине 30 см, последний – на глубине 210 см (рис. 1). Каждый датчик обладал полной энергонезависимостью (до двух лет), имел цифровой термометр для регистрации температуры с точностью  $\pm 0.5$  °C и внутреннюю память для сохранения измерений. Замеры производились каждые 4 часа.

Для работы с действительными значениями температур осуществлялась интерпретация данных из dat-файлов датчиков, а также преобразование значений, записанных во внутреннем формате датчиков, в действительные значения температур в соответствии с их технической документацией. Для использования в расчетах и визуализации



Fig. 2. Fragment of mean monthly temperatures of the soil

данные, сохраненные датчиками в различные промежутки времени, собирались в общий массив и рассчитывались среднесуточные температуры горизонтов грунта.

Ниже приведен фрагмент вычисленных температур (среднесуточных) для одного из постов за 1 месяц наблюдений в графическом формате (рис. 2).

#### Визуализация метеорологических данных

Для визуализации таких метеорологических данных удобно использовать обычные двумерные графики, показывающие зависимость исследуемого параметра от времени, но может возникнуть следующая проблема: одна элементарная единица отображения (например, пиксель) может содержать в себе несколько точек графика. В таком случае важно сохранить смысловую нагрузку графика и не потерять ключевые значения в результате визуализации. Для этого могут быть использованы различные алгоритмы прореживания данных.

Наиболее простым способом прореживания является отображение каждой n-ой точки (число n будем называть шагом прореживания). Очевидно, что чем больше число n, тем меньше точек будет содержать результат визуализации. Преимуществом такого подхода является простота реализации, а основным недостатком – возможность потери информативных выбросов. Результат применения такого подхода приведен на рис. 3.

В некоторых случаях бывает удобнее работать с аппроксимированным графиком. На рис. 4 представлен результат визуализации с использованием сплайнов Катмулла–Рома и В-сплайнов.

Визуализация данных позволила наглядно проследить следующее проявление особенности режима промерзания: температурные выбросы, заметные на показаниях датчиков, расположенных ближе к поверхности, гораздо реже наблюдаются в средних горизонтах и практически незаметны в нижних. Другими словами, подтверждена концепция, утверждающая, что для промерзания нижних горизонтов необходимо продолжительное воздействие низких температур на верхние горизонты. Это утверждение доказывается и прогнозными оценками промерзания грунта на разных горизонтах на следующий месяц после прекращения наблюдений. На рис. 5 приведен пример месячного прогноза для одного из постов наблюдений для горизонта 0,9 м.



Рис. 3. Графики зависимости температуры грунта от времени на глубине 0,3 м до прореживания (а) и после прореживания с шагом 4 (б)

Fig. 3. Graphs of soil temperature time dependence at depth of 0,3 m before thinning (a) and after thinning in increments of 4 (b)



Рис. 4. Температуры грунта на различных глубинах после аппроксимации сплайнами Катмулла-Рома (а) и Всплайнами (б)

Fig. 4. Soil temperatures at different depths after approximation by Katmull-Rom splines (a) and B-splines (b)

Прогноз был выполнен с использованием библиотеки fbprophet 0.2.1 (Facebook Open Source) [35]. Ось Х – время наблюдений, ось Y – необработанные данные с датчика. Использована процедура прогнозирования данных временных рядов на основе аддитивной модели, где нелинейные тренды соответствуют годовой и недельной сезонности. Из-за недостатка данных можно говорить только о качественном характере как прогнозной оценки, так и о ее верхней и нижней границе (рис. 6).

## Анализ корреляционных полей температурного состояния грунта

При обработке больших рядов экспериментальных данных для многих целей статистического анализа очень эффективными бывают приближенные оценки измеряемых величин на основе корреляционных соотношений и связей [36–39]. Корреляционные модели и соотношения могут обеспечить приемлемую для практики точность оценки экспериментальных измерений. В таких моделях



Puc. 5. Реальные и прогнозные оценки температуры грунта на глубине 0,9 м Fig. 5. Real and predictive estimates of soil temperature at a depth of 0,9 m

Детальный прогноз



Рис. 6. Детальные прогнозные оценки температуры грунта на глубине 0,9 м

Fig. 6. Detailed predictive estimates of soil temperature at a depth of 0,9 m

не устанавливается явная зависимость между измеряемыми величинами, но прогнозируется синхронность или асинхронность их изменений, что косвенно позволяет оценить и их количественные характеристики. Более того, результаты корреляционного анализа могут предопределить и характер функциональной зависимости прогнозных моделей исследуемых данных, в том числе и робастность некоторых измеряемых величин.

Ниже представлены результаты корреляционного анализа с использованием коэффициента корреляции Пирсона, т. е. результаты корреляции моментов произведений температурных значений на различных глубинах грунта. На рис. 7 представлена матрица частных коэффициентов корреляции значений температур слоев грунта за весь период наблюдений (т. е. в течение 100 дней с начала наблюдений) на горизонтах: 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8 и 2,1 м. Матрицы частных коэффициентов корреляции были рассчитаны на выборках с различными временными масштабами. Первая матрица была построена на основе данных, полученных в течение 10 дней с начала наблюдений. Последующие матрицы строились на основе данных, полученных в течение 20 дней с начала наблюдений, 30 дней с начала наблюдений и т. д. (всего 10 матриц).

На рис. 8 представлен график значений вычисленных матриц частных коэффициентов корреляций. График изменения коэффициентов корреляции был построен на данных матриц частных коэффициентов корреляций. Точки на графике, расположенные на одном и том же временном масштабе, характеризуют значения, полученные в результате вычисления матриц (всего 10 матриц) частных коэффициентов корреляций за тот или иной период наблюдений. Для анализа частотных компонентов в рядах зарегистрированных температур были построены их вейвлет-спектрограммы для всех горизонтов наблюдений. На рис. 9 представлен вариант полученной плоскости вейвлет коэффициентов для одного из горизонтов регистрации температуры, а на рис. 10 – их пространственный вариант.

Спектрограмма DOG вейвлет-преобразования (Difference of Gausians) построена по действительной части вейвлет-коэффициентов. Для формирования изображения в формате ВМР использовался язык программирования Java. Ось абсцисс отражает время фиксирования температуры датчиком (параметр сдвига), ось ординат – масштаб вейвлета (период сигнала). Цвет пикселя отображает амплитуду вейвлет-коэффициента. Для спектрограммы в виде 3D-поверхности были использованы возможности библиотеки Jzy3D [40]. Координаты вейвлет-спектрограммы 3D в условных единицах соответствуют значениям спектрограмм в 2D-изображении. Для наглядности положение вейвлетспектрограмма 3D в пространстве изменено (выполнено вращение вокруг оси уровня).



Корреляционная матрица по данным с поста №10 с 15 октября 2006 г. по 24 января 2007 г.

Fig. 7. Correlation coefficients matrix

Рис. 7. Матрица частных коэффициентов корреляции



Рис. 8. График значений частных коэффициентов корреляции

Fig. 8. Graph of change in correlation coefficients



**Рис. 9.** Вейвлет-спектрограмма 2D

Fig. 9. Wavelet spectrogram 2D



**Рис. 10.** Вейвлет-спектрограмма 3D

Fig. 10. Wavelet spectrogram 3D

#### Заключение

С увеличением глубины грунта график значений температур промерзания принимает более плоский характер (количество «ступенек» уменьшается). С увеличением разницы (удаленности) между горизонтами (слоями) грунта уменьшается температурная корреляционная связь между ними.

Расчеты показали (рис. 8), что в горизонтах грунта с самой сильной температурной корреляционной зависимостью, а именно «температура грунта на глубине 1,9 м – температура грунта на глубине 2,1 м», коэффициент корреляции практически не изменяется на всех временных масштабах выборки.

У горизонтов грунта с менее сильной температурной корреляционной связью, например, «температура грунта на глубине 0,9 м – температура грунта на глубине 1,2 м», «температура грунта на глубине 1,2 м – температура грунта на глубине 1,5 м», «температура грунта на глубине 1,5 м», «температура грунта на глубине 1,5 м»,

температура грунта на глубине 1,8 м» на малых временных масштабах выборки наблюдаются минимальные изменения коэффициентов корреляции, на средних временных масштабах выборки наблюдаются максимальные изменения коэффициентов корреляции (но сохраняется положительная корреляционная зависимость), а на больших временных масштабах выборки наблюдается незначительное изменения коэффициентов корреляций.

У горизонтов грунта со средним коэффициентом температурной корреляции, например, «температура грунта на глубине 0,3 м – температура грунта на глубине 2,1», «температура грунта на глубине 0,3 м – температура грунта на глубине 1,8 м», «температура грунта на глубине 0,6 м температура грунта на глубине 2,1 м» на малых временных масштабах выборки наблюдаются минимальные изменения коэффициентов корреляции, на средних масштабах временной выборки наблюдаются значительные изменения коэффициентов корреляций, что приводит к переходу от положительной корреляционной зависимости к отрицательной корреляционной зависимости. Это происходит из-за того, что между слоями грунта, залегающими ближе к поверхности земли, и слоями, залегающими на уровне промерзания грунта (или приближенных к нему), в холодный период года происходят разные физические процессы, что обусловлено физико-механическими параметрами грунта.

На больших временных масштабах выборки за счет её увеличения, т. е. добавления в расчеты значений температур слоев грунта за относительно теплые периоды года, наблюдается переход от отрицательной температурной корреляционной зависимости между слоями грунта к положительной.

Во всех парах сравниваемых горизонтов грунта с увеличением временного масштаба выборки наблюдается стабилизация значений коэффициентов температурной корреляции, т. е. статистическая значимость корреляционных связей однозначно определяется объемом выборки.

Измеряемые датчиками значения температур грунта на различных глубинах являются суперпо-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года». URL: http://gov.garant.ru/document?id=72038606&byPara=1 (дата обращения: 15.05.2018).
- Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 341 с.
- Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове (на примере агросерых почв центральной части Русской равнины): дис. ... д-ра биол. наук. – М., 2008. – 375 с.
- Апарин Б.Ф. Законы естествознания В.В. Докучаева // Законы почвоведения: новые вызовы: Материалы Междунар. науч.

зицией сигналов в широком частотном диапазоне. Поэтому частотно-временной анализ, даже используемый с применением стандартных методов, позволяет получить дополнительную информацию не только о параметрах исследуемого сигнала (температуры), например, с точки зрения «полезный сигнал – шум», но и о свойствах среды, в которой производится его распространение. Кроме того, частотно-временной анализ дает возможность оценить корреляционные зависимости и в частотной области. В частности, по полученным температурным рядам были построены спектрограммы вейвлет-преобразований для классических базисных вейвлетов (вейвлет Морле, DOG-вейвлет, вейвлет Пауля). Визуальный анализ полученных вейвлетспектрограмм, особенно представленных в виде 3D-поверхностей, выявил дрейф амплитуд вейвлет-коэффициентов по временной оси. Безусловно, для понимания физической причины этого факта и построения его математической модели требуется исследование физико-механических параметров грунта и больший объем измеряемых данных. Тем не менее, можно выдвинуть предположение о волнообразном «продвижении» фронта (фазы) холода в грунте. Вычислительные эксперименты с базисными вейвлетами Морле и Пауля не так наглядно, но тоже подтверждают это предположение. Безусловно, осуществить прямое наблюдение и измерение распространения тепловых волн достаточно сложно, но для косвенной демонстрации их существования проведенных программных экспериментов, может быть, и достаточно.

В целом анализ корреляционных полей температур грунта позволил более точно спрогнозировать значения температур и вне уровней горизонтов регистрирующих датчиков и выработать практические рекомендации для регулирования теплового режима полотна исследуемой автомобильной трассы. В дальнейшем полученные результаты можно использовать в задаче предсказания температурного режима грунтов на соответствующих участках дорог и в задаче установления средней влажности грунта с привлечением данных об атмосферных осадках и среднемесячных температурах воздуха.

конф. XVI Докучаевские молодежные чтения. - СПб., 2013. - С. 4-13.

- Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 599–608.
- Каверин Д.А., Пастухов А.В. Особенности температурного режима сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов европейского Северо-Востока России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. № 87. С. 3–21.
- Вклад климатических факторов в формирование температурных режимов почв прерывистой криолитозоны северной тайги Западной Сибири / О.Ю. Гончарова, Г.В. Матышак, А.А. Бобрик, Д.Г. Петров, М.О. Тархов, М.М. Удовенко // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – 2017. – № 87. – С. 39–54.

- Скютте Н.Г., Романис Т.В. Термический режим почв термального урочища Пымвашор // Естественные науки. 2013. № 4. С. 30–37.
- Галенко Э.П. Формирование теплового режима почв хвойных экосистем бореальной зоны в зависимости от лесообразующей породы и типа леса // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2013. – Т. 1 (13). – С. 32–37.
- Десяткин Р.В., Десяткин А.Р. Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле // Почвоведение. – 2017. – № 11. – С. 1344–1354.
- Влияние температуры и влажности на минерализацию и гумификацию лиственного опада в модельном инкубационном эксперименте / А.А. Ларионова, А.Н. Мальцева, В.О. Лопес де Гереню, А.К. Квиткина, С.С. Быховец, Б.Н. Золотарева, В.Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2017. – № 4. – С. 438–448.
- Киселёв М.В., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А. Температурный режим почв осоково-сфагновой топи верхового болота в южной тайге Западной Сибири // География и природные ресурсы. – 2017. – № 3. – С. 110–117.
- Битюков Н.А. Температурный режим бурых лесных почв под букняками // Известия Сочинского государственного университета. – 2012. – № 3 (21). – С. 219–223.
- Базыкина Г.С. Почвы степной и сухостепной зон в аномальных погодных условиях последних десятилетий // Бюл. Почв. инта им. В.В. Докучаева. – 2014. – № 73. – С. 54–68.
- Архангельская Т.А. Температурный режим комплексного почвенного покрова. – М.: ГЕОС, 2012. – 282 с.
- Convergence in temperature sensitivity of soil respiration: Evidence from the Tibetan alpine grasslands / Y. Wang, C. Song, L. Yu, Z. Mi, S. Wang, H. Zeng, C. Fang, J. Li, J. He // Soil Biology and Biochemistry. - 2018. - V. 122. - P. 50-59.
- Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states / F. Shati, S. Prakash, H. Norouzi, R. Blake // Cold Regions Science and Technology. 2018. V. 145. P. 86–92.
- Ecosystem controlled soil-rock pCO<sub>2</sub> and carbonate weathering Constraints by temperature and soil water content / G. Romero-Mujallia, J. Hartmanna, J. Borker, J. Gaillardet, D. Calmels // Chemical Geology. – 2018. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254118300421? via% 3Dihub (дата обращения: 15.05.2018).
- Effects of biochar on spatial and temporal changes in soil temperature in cold waterlogged rice paddies / Y. Liu, S. Yang, H. Lu, Y. Wang // Soil & Tillage Research. 2018. V. 181. P. 102-109.
- Soil Physicochemical and Microbial Drivers of Boreal Forest Soils Temperature Sensitivity / B. Klimek, M. Chodak, M. Jazwa, H. Azarbad, M. Niklinska // Pedosphere. – 2017. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1002016017604004?via% 3Dihub (дата обращения: 15.05.2018).
- Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland / Y. Song, C. Song, A. Hou, J. Ren, M. Wang // Catena. 2018. V. 165. P. 381-389.
- Temperature response of soil organic matter mineralisation in arctic soil profiles / C. Moni, T. Lerch, R. Zarruk, L. Strand, D. Rasse // Soil Biology and Biochemistry. - 2015. - V. 88. -P. 236-246.
- Perez F. Hot soils and cooler stones: Geoecological influence of volcanic tephra and boulders on soil temperature, and significance for plant distribution in Haleakalā Crater (Maui, Hawai'i) // Catena. - 2017. - V. 158. - P. 9-19.
- 24. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments / M. Yoshioka, S. Takakura, T. Ishizawa, N. Sakai // Journal of Applied Geophysics. – 2015. – V. 114. – P. 134–145.

- Mengistu A., Rensburg L., Mavimbela S. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa // Catena. - 2017. - V. 158. -P. 184-193.
- 26. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a drip-irrigated intercropping field with plastic mulch / X. Li, J. Simunek, H. Shi, J. Yan, X. Gond // European Journal of Agronomy. 2017. V. 83. P. 47-56.
- 27. Gu X., Li Y., Du Y. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (Brassica napus L.) // Soil & Tillage Research. - 2017. - V. 171. -P. 42-50.
- Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading / Z. Zhu, G. Kang, Y. Ma, Q. Xie, J. Ning // Mechanics of Materials. - 2016. - V. 102. - P. 108-116.
- 29. Spatial variation of temperature of surface soil layer adjacent to constructions: A theoretical framework for atmosphere-building-soil energy flow systems / H. Zhou, J. Chang, J. Sun, C. Shang, D. Hu // Building and Environment. 2017. V. 124. P. 143–152.
- Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths / S. Samadianfard, E. Asadi, S. Jarhan, H. Kazemi, A. Manaf // Soil and Tillage Research. - 2018. - V. 175. - P. 37-50.
- Gao H., Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties // Soil & Tillage Research. - 2015. - V. 153. -P. 145-154.
- Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles / A. Tabbagh, B. Cheviron, H. Henine, R. Guerin, M. Bechkit // Advances in Water Resources. 2017. V. 105. P. 217-226.
- Chapter Five: Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and its Similarity to Heat Pulse Method / H. He, M. Dyck, R. Horton, M. Li, B. Si // Advances in Agronomy. – 2018. – V. 148. – P. 173–230.
- 34. Киряков Е.И., Ефименко В.Н. Уточнение методики прогнозирования параметров водно-теплового режима земляного полотна применительно к районам глубокого сезонного промерзания // Обеспечение качества автомобильных дорог в условиях Сибири: сб. науч. трудов. – Кемерово: Изд-во Кузбасс. гос. техн. ун-та, 1997. – С. 32–36.
- fbprophet 0.2.1. Project description. URL: https://pypi.org/ project/fbprophet/#description (дата обращения: 15.05.2018).
- 36. Разработка веб-гис приложения для вычисления коэффициента корреляции для климатических и метеорологических характеристик / Е.П. Гордов, А.Г. Титов, А.А. Притупов, И.А. Ботыгин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 5. – С. 91–98.
- 37. Об одном подходе к кластеризации объектов / И.А. Ботыгин, С.Г. Катаев, В.А. Тартаковский, А.И. Шерстнёва // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 78–86.
- Гайдадин А.Н., Ефремова С.А., Абакумова Н.Н. Применение корреляционного анализа в технологических расчетах. URL: http://lit.vstu.ru/ucheba/Metodiki/korr.pdf (дата обращения: 15.05.2018).
- Tartakovsky V.A., Botygin I.A., Sherstneva A.I. Synchronous analysis of statistical characteristics of natural climatic processes // 23<sup>rd</sup> International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proc. of SPIE. – Irkutsk, 2017. – V. 10466. – P. 5J1–5J5.
- 40. Jzy3D Scientific 3D plotting. URL: http://www.jzy3d.org/(дата обращения: 15.05.2018).

Поступила 21.05.2018 г.

## Информация об авторах

**Ботыгин И.А.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Крутиков В.А.*, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории геоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук.

Шерстнёва А.И., кандидат физико-математических наук, доцент отделения математики и информатики Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Демешко М.В., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Канаева И.А., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Солтаганов H.A., магистрант отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.341:551.343.7

## COMPUTING OF TEMPERATURE CORRELATIONS BETWEEN SOIL LAYERS IN RESEARCH WITH SHALLOW BOREHOLES

Igor A. Botygin<sup>1</sup>,

bia@tpu.ru

Vladimir A. Krutikov<sup>2</sup>,

krutikov@imces.ru

Anna I. Sherstneva<sup>1</sup>, sherstneva@tpu.ru

## Maria V. Demeshko<sup>1</sup>,

demeshkomaria@gmail.com

## Irina A. Kanaeva<sup>1</sup>,

irk-2009@yandex.ru

## Nikolay A. Soltaganov<sup>1</sup>,

nasoltaganov@yandex.ru

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.
- <sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Academichesky avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to study geological objects by direct geophysical measurements of their parameters and applications of the obtained data and the results of mathematical processing for solving environmental management problems. Effective solution of these problems is especially important when research the influence of meteorological parameters on the water-thermal regime of rocks in areas with deep seasonal freezing.

**The main aim** of the research is to develop a geophysical complex to determine the spatial distribution of temperature in the ground, to research the dynamics of changes in this distribution over time, to compute correlation of freezing various soil horizons in the conditions of Siberia and the Far North.

**Objects** of researches are the federal highway «Surgut–Salekhard» within the Yamal-Nenets Autonomous District and the road of territorial importance «Korotchaevo–Urengoy».

**Methods:** methods of analyzing statistical data to research the relationship between the values of variables, including the study of the statistical relationship of two or more random variables (correlation analysis), functional analysis methods for the research of statistical data in the time-frequency range (wavelet transform).

**Results.** It was shown that with an increase in soil depth the freezing pattern is more flat and with increasing distance between observation horizons the correlation between them decreases. In particular, in soil layers 1,9-2,1 m the values of the coefficients of temperature correlation practically do not change at all time scales of the sample. In the soil layers 0,9-1,2 m, 1,2-1,5 m, 1,5-1,8 m on the average time scales of the sample, there is an insignificant change in the coefficients of temperature correlation, and the maximum deviation of the correlation coefficients is observed at large sample time scales. In the soil layers 0,3-2,1 m, 0,3-1,8 m, 0,6-2,1 m on the average time scales of the sample, there is a significant deviation of the coefficients of temperature correlation, and the maximum deviation of the coefficients of temperature correlation is also observed at large scales of the sample. On the basis of the obtained temperature series, spectrograms of wavelet transforms for classical basic wavelets (Morlet wavelet, DOG wavelet, Paul wavelet) were obtained, which indirectly demonstrate the wavelike «promotion» of the cold front (phase) in the ground.

#### Key words:

Geological environment, correlation analysis, environmental management, wavelet transform, shallow well method, geophysical research, thermal regime of rocks.

## REFERENCES

- Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 22 dekabrya 2018 № 2914-p «Strategiya razvitiya mineralno-syryevoy bazy Rossiyskoy Federatsii do 2035 goda» [Order of the Government of the Russian Federation of December 22, 2018 No. 2914-p «Strategy for development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035». Available at: http://gov.garant.ru/document?id= 72038606&byPara=1 (accessed 15.05.2018).
- Shulgin A.M. Klimat pochvy i ego regulirovanie [Soil climate and its regulation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 341 p.
- Arkhangelskaya T.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove (na primere agroserykh pochv tsentralnoy chasti Russkoy ravniny). Dis. Doct. nauk [Regularities of spatial distribution of soil temperature in a complex soil cover (on the example of agroserous soils of the central part of the Russian Plain). Dr. Diss.]. Moscow, 2008. 375 p.
- 4. Aparin B.F. Zakony estestvoznaniya V.V. Dokuchaeva [The laws of natural science of V.V. Dokuchaev]. Zakony pochvovedeniya: novye vyzovy. XVI dokuchaevskie-molodezhnye-chteniya. Materi-

*aly mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Laws of Soil Science: New Challenges: Materials of the International scientific conference XVI Dokuchayevsk youth reading]. St. Petersburg, 2013. pp. 4–13.

- Dymov A.A, Startsev V.V. Change in the temperature regime of podzolic soils in the process of natural reforestation after clearcut logging. *Soil Science*, 2016, no. 5, pp. 599–608. In Rus.
- 6. Kaverin D.A., Pastukhov A.V. Peculiarities of the temperature regime of seasonally freezing soils in tundra landscapes of the European North-East of Russia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87. pp. 3–21. In Rus.
- Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A, Petrov D.G., Tarkhov M.O., Udovenko M.M. The contribution of climatic factors to the formation of temperature regimes of soils of intermittent cryolithozone of the northern taiga of Western Siberia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87, pp. 39–54. In Rus.
- Skytte N.G., Romanis T.V. Thermal regime of soils in the thermal tract Pymwashor. *Natural sciences*, 2013, no. 4, pp. 30-37. In Rus.
- Galenko E.P. Formation of the thermal regime of soils of coniferous ecosystems in the boreal zone as a function of the forest-forming species and forest type. *Izvestiya Komi Scientific Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 1 (13), pp. 32-37. In Rus.
- Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Thermal regime of cryogenic meadow-chernozem solonetsous soil in the multi-year cycle. *Soil Sci*ence, 2017, no. 11, pp. 1344–1354. In Rus.
- Larionova A.A., Maltseva A.N., Lopez de Gerenyu V.O., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Zolotareva B.N., Kudeyarov V.N. Influence of temperature and humidity on mineralization and humification of deciduous litter in a model incubation experiment. *Soil Science*, 2017, no. 4, pp. 438–448. In Rus.
- Kiselev M.V., Voropai N.N., Dyukarev E.A. Temperature regime of soils of sedge-sphagnum swamp of a highland bog in the southern taiga of Western Siberia. *Geography and Natural Resources*, 2017, no. 3, pp. 110–117. In Rus.
- Bityukov N.A. Temperature regime of brown forest soils under the bibliks. Sochi Journal of Economy, 2012, no. 3 (21), pp. 219-223. In Rus.
- Bazykina G.S. Soils of the steppe and dry steppe zones in the abnormal weather conditions of recent decades. Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva, 2014, vol. 73. pp. 54–68. In Rus.
- 15. Arkhangelskaya T.A. *Temperaturny rezhim kompleksnogo pochvennogo pokrova* [Temperature regime of the complex soil cover]. Moscow, GEOS Publ., 2012. 282 p.
- Wang Y., Song C., Yu L., Mi Z., Wang S., Zeng H., Fang C., Li J., He J. Convergence in temperature sensitivity of soil respiration: Evidence from the Tibetan alpine grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 122, pp. 50-59.
- Shati F., Prakash S., Norouzi H., Blake R. Assessment of differences between near-surface air and soil temperatures for reliable detection of high-latitude freeze and thaw states. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 145, pp. 86–92.
- Romero-Mujallia G., Hartmanna J., Borker J., Gaillardet J., Calmels D. Ecosystem controlled soil-rock pCO<sub>2</sub> and carbonate we athering Constraints by temperature and soil water content. *Chemical Geology*, 2018. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254118300421? via% 3Dihub (accessed 15 May 2018).
- Liu Y., Yang S., Lu H., Wang Y. Effects of biochar on spatial and temporal changes in soil temperature in cold waterlogged rice paddies. Soil & Tillage Research, 2018, vol. 181, pp. 102–109.
- Klimek B., Chodak M., Jazwa M., Azarbad H., Niklinska M. Soil Physicochemical and Microbial Drivers of Boreal Forest Soils Temperature Sensitivity. *Pedosphere*, 2017. Available at:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1002016017604004?via%3Dihub (accessed 15 May 2018).

- Song Y., Song C., Hou A., Ren J., Wang M. Effects of temperature and root additions on soil carbon and nitrogen mineralization in a predominantly permafrost peatland. *Catena*, 2018, vol. 165, pp. 381–389.
- Moni C., Lerch T., Zarruk R., Strand L., Rasse D. Temperature response of soil organic matter mineralisation in arctic soil profiles. Soil Biology and Biochemistry, 2015, vol. 88, pp. 236-246.
- Perez F. Hot soils and cooler stones: Geoecological influence of volcanic tephra and boulders on soil temperature, and significance for plant distribution in Haleakalā Crater (Maui, Hawai'i). *Catena*, 2017, vol. 158, pp. 9–19.
- Yoshioka M., Takakura S., Ishizawa T., Sakai N. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, vol. 114, pp. 134–145.
- Mengistu A., Rensburg L., Mavimbela S. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa. *Catena*, 2017, vol. 158, pp. 184–193.
- Li X., Simunek J., Shi H., Yan J., Gond X. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a drip-irrigated intercropping field with plastic mulch. *European Journal of Agronomy*, 2017, vol. 83, pp. 47–56.
- Gu X., Li Y., Du Y. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (Brassica napus L.). Soil & Tillage Research, 2017, vol. 171, pp. 42–50.
- Zhu Z., Kang G., Ma Y., Xie Q., Ning J. Temperature damage and constitutive model of frozen soil under dynamic loading. *Mechanics of Materials*, 2016, vol. 102, pp. 108–116.
- Zhou H., Chang J., Sun J., Shang C., Hu D. Spatial variation of temperature of surface soil layer adjacent to constructions: a theoretical framework for atmosphere-building-soil energy flow systems. *Building and Environment*, 2017, vol. 124, pp. 143–152.
- 30. Samadianfard S., Asadi E., Jarhan S., Kazemi H., Manaf A. Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths. *Soil and Tillage Research*, 2018, vol. 175, pp. 37–50.
- Gao H., Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties. Soil & Tillage Research, 2015, vol. 153, pp. 145–154.
- Tabbagh A., Cheviron B., Henine H., Guerin R., Bechkit M. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles. *Advances in Water Resources*, 2017, vol. 105, pp. 217-226.
- He H., Dyck M., Horton R., Li M., Si B. Chapter Five: Distributed Temperature Sensing for Soil Physical Measurements and Its Similarity to Heat Pulse Method. Advances in Agronomy, 2018, vol. 148, pp. 173-230.
- 34. Kiryakov E.I., Efimenko V.N. Utochnenie metodiki prognozirovaniya parametrov vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna primenitelno k rayonam glubokogo sezonnogo promerzaniya [Refinement of the methodology for predicting the parameters of the water-thermal regime of the roadbed with reference to areas of deep seasonal freezing]. Obespechenie kachestva avtomobilnykh dorog v usloviyakh Sibiri. Sbornik nauchnykh trudov [Maintenance of quality of highways in the conditions of Siberia. Collection scientific works]. Kemerovo, KGTU Publ., 1997. pp. 32–36.
- fbprophet 0.2.1. Project description. Available at: https://pypi.org/project/fbprophet/#description (accessed 15 May 2018).
- Gordov E.P., Titov A.G., Pritupov A.A., Botygin I.A. Developing web applications to calculate correlation coefficient for climatic and meteorological parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic* University, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 91–98. In Rus.
- Botygin I.A, Kataev S.G., Tartakovskiy V.F., Sherstneva A.I. An approach to clustering objects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic* University. Geo Assets Engineering, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 78-86. In Rus.

- Gaydadin A.N., Efremova S.A., Abakumova N.N. Primenenie korrelyatsionnogo analiza v tekhnologicheskikh raschetakh [The use of correlation analysis in technological calculations]. Available at: http://lit.vstu.ru/ucheba/Metodiki/korr.pdf (accessed 15 May 2018).
- Tartakovsky V.A., Botygin I.A., Sherstneva A.I. Synchronous analysis of statistical characteristics of natural climatic proces-

ses. 23<sup>rd</sup> International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proc. of SPIE, 2017, vol. 10466, pp. 5J1-5J5.

 Jzy3D - Scientific 3D plotting. Available at: http://www.jzy3d.org/ (accessed 15 May 2018).

Received: 21 May 2018.

## Information about the authors

Igor A. Botygin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vladimir A. Krutikov*, Dr. Sc., Head of Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.

Anna I. Sherstneva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Maria V. Demeshko, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina A. Kanaeva, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay A. Soltaganov, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.4.04

## РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ НА УЧАСТКАХ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ СПОРТИВНО-ТУРИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ГОРНЫЙ ВОЗДУХ» (ГОРА БОЛЬШЕВИК, Г. ЮЖНО-САХАЛИНСК)

## Ильин Владимир Вениаминович<sup>1</sup>,

vladimirilyin7@gmail.com

## Сахаров Валерий Александрович<sup>1</sup>,

sakhsakh@yandex.ru

<sup>1</sup> Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности эксплуатации объектов СТК «Горный воздух». На склоновой части СТК опасность могут представлять оползневые процессы. Для оценки динамики развития оползневых процессов в местах массового скопления людей при эксплуатации СТК выполнена первая стадия специализированного мониторинга.

**Цель:** изучить динамику оползневых процессов и выполнить оценку устойчивости склонов в местах скопления большого количества отдыхающих и спортсменов для целей их безопасного пребывания.

**Объекты:** Северный, Южный и Западный склоны горы Большевик; грунты, слагающие верхнюю часть литосферы до глубины 10 м; подземные воды.

**Методы:** выполнение профильных исследований в крест простирания склона – маршрутные рекогносцировочные обследования, проходка шурфов до двух метров глубиной (полное прохождение делювиальных отложений и вскрытие элювиальных пород), отбор проб ненарушенной структуры с интервалом 0,2–0,3 м, геофизические исследования методом георадиолокационного просвечивания с использованием мобильной георадарной установки ОКО-2, лабораторное тестирование отобранных образцов грунта. Грунтовые воды в процессе исследований не встречены.

**Результаты.** По данным исследований в ноябре-декабре 2017 г. на трех участках СТК «Горный воздух» – Северный склон, Южный и Западный склоны – выделены репрезентативные участки на склонах, выполнено уточнение инженерно-геологического разреза перечисленных склонов, в частности – положение границы «делювий-элювий», произведен расчет инженерно-геологического гических элементов и расчеты коэффициентов устойчивости склонов в пределах изученных участков по методике касательных сил для прислоненного откоса при отсутствии грунтовых вод.

#### Ключевые слова:

Склон, склоновые процессы, оползневые процессы, делювиальные отложения, элювий, объемный вес грунта, угол внутреннего трения, уклон поверхности скольжения, грунтовые воды, сейсмичность территории.

## Введение

Развитие Спортивно-туристического комплекса (СТК) «Горный воздух» для Сахалинской области и Дальнего Востока РФ имеет приоритетное значение. Ежедневно комплекс принимает сотни и тысячи спортсменов и отдыхающих, как в зимний, так и в летний периоды. Соответственно, безопасность эксплуатации объекта и безопасность пребывающих там людей выходит на первый план [1–3]. В этой связи администрация СТК «Горный воздух» начала реализацию программы мониторинга по изучению развития склоновых процессов в пределах территории комплекса.

#### Исходные данные

В качестве исходных данных были изучены сведения о климате, гидрографической сети, рельефе, геоморфологии, особенностях геологического строения, гидрогеологических условиях, геологических и инженерно-геологических процессах, физико-механических свойствах грунтов, техногенных воздействиях на окружающую среду, отраженные в технических отчетах по результатам инженерных изысканий на территории СТК. Также было оценено современное состояние изученности склоновых процессовв научно-исследовательской литературе [4–16]. На основании собранных материалов был определен состав, объемы и методика исследовательских работ.

Исследования были выполнены для трех участков (рис. 1) канатно-кресельных и гондольных трасс – Северный склон (рис. 2), Трасса Юг (рис. 3) и Трасса Запад (рис. 4) (результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ: 5.9560.2017/8.9). На каждом участке был отработан профиль протяженностью 210-320 м, с проходкой шести шурфов глубиной до двух метров, отбором проб грунта с интервалом 0,2-0,3 м и георадиолокационным просвечиванием георадарной установкой ОКО-2 до глубины 10-12 м. Для отобранных образцов грунта были выполнены физические тесты в грунтовой лаборатории СахГУ. Механические характеристики выделенных ИГЭ были приняты по результатам ранее выполненных работ, показатели удельного сцепления для ИГЭ-3 оценены по справочным данным, так как лабораторные значения для выветрелых сланцев выглядят несколько завышенными (для сравнения – 0,015 и 0,25 МПа).



Рис. 1. Схема расположения участков мониторинговых исследований

Fig. 1. Scheme of location of monitoring sites



Рис. 2. Канатно-кресельная трасса «Северный склон»



**Puc. 3.** Канатно-кресельная трасса «Юг» **Fig. 3.** Cable-chairlift «Yug»



Рис. 4. Канатно-гондольная трасса «Запад»

Fig. 4. Cable-gondola route «Zapad»

Климат. Для Южно-Сахалинской климатической зоны, как и для всего острова Сахалин, характерна сезонная смена воздушных течений, возникающих под влиянием термических контрастов между материком и океаном, а также вызываемая изменением в местоположении тихоокеанского антициклона и тропосферных фронтов (полярного и арктического) [17]. С октября по март в районе дальневосточных морей господствует зимний тип циркуляции, формирующийся осенью, на фоне нагретого за лето океана и быстро охлаждающегося материка, а весной – наоборот. Летом характерно активное развитие циклонической деятельности над Азиатским континентом (дальневосточная депрессия над бассейном Амура) и антициклогенез (северо-тихоокеанский и охотский антициклоны) над Тихим океаном и дальневосточными морями. Взаимодействие летней дальневосточной депрессии с северо-тихоокеанским и охотским антициклонами обусловливает интенсивный перенос в летнем муссоне теплых и влажных масс воздуха с океана на материк. Геоморфология и рельеф. В геоморфологическом отношении территория исследований приурочена к северо-западному отрогу Сусунайского хребта, который является складчато-горстовой структурой сложного строения [18]. Западные склоны Сусунайского хребта плавно переходят в Сусунайскую межгорную впадину (Сусунайскую депрессию). Абсолютные отметки поверхности земли в пределах исследуемого участка изменяются от 100,0 до 599,4 м БС (вершина горы Большевик). Углы наклона склона изменяются в значительной степени: нижняя половина склона характеризуется углами наклона от 5–7 до 22–25 градусов, а на верхнем участке площадки исследований крутизна склона превышает 30 градусов.

Гидрология. Рассматриваемый район, как и вся территория Сахалина, относятся к зоне избыточного увлажнения [17]. Для нее характерны два сезона с максимальным стоком – весеннее половодье и дождевые паводки, и два сезона с минимальным стоком - летняя и зимняя межень. По данным ФГБУ «Сахалинское УГМС» установлено, что в рассматриваемом районе максимальные расходы воды и соответствующие им уровни дождевых паводков значительно превышают уровни и расходы весеннего половодья. Питание рек и ручьёв смешанное -снеговое, дождевое, грунтовое. В маловодные периоды устойчивое питание водотоков осуществляется преимущественно за счет разгрузки грунтовых вод. В местах сокращения мощности или полного выклинивания грунтового водоносного горизонта формируются родники нисходящего типа. Реки и ручьи рассматриваемого района относятся к типу водотоков с весенним половодьем и летне-осенними дождевыми паводками. Доля стока талых вод в годовом объёме составляет 50-60 %. Грунтовое питание устойчивое [19]. Его доля составляет 10-15 % общего стока.

Геологическое строение. В геологическом строении исследуемой территории принимает участие комплекс метаморфических пород красноярковской свиты верхнего отдела меловой системы (K<sub>2</sub>kr) [18, 20], представленной зеленокаменными породами, хлорит-эпидот-кварцевыми сланцами, которые образуют сложную складчатую структуру с узкими линейно вытянутыми складками с пологими углами наклона крыльев (25–50°) восточного простирания. Хлорит-эпидот-кварцевые сланцы красноярковской свиты (K<sub>2</sub>kr) практически повсеместно перекрыты чехлом отложений четвертичной системы (Q).

Отложения неогеновой системы распространены локально в нижней части исследуемого участка и представлены алевролитами (туфогенными) аракайской свиты неогена (N<sub>1</sub>ar).

Четвертичные отложения широко распространены и залегают непосредственно на дневной поверхности, имеют мощность от 0,3 до 25 м. Представлены разнообразными генетическими типами, среди которых наиболее широко развиты делювиальные, коллювиальные, элювиальные и техногенные образования.

Тектоника. В тектоническом отношении исследуемая территория расположена в районе дифференцированных блоковых движений (Западно-Сусунайская шовная зона течения и метаморфизма), где выделяется сусунайский взброс – региональное разрывное нарушение, которое прослеживается по западному борту сусунайской депрессии в меридиональном направлении и ограничивает с востока поле распространения верхнемеловых пород [20]. Разлом сопровождается зоной брекчевания шириной около 0,5 км, оперяющими разрывами (более молодыми, крутопадающими сбросами и сбросо-надвигами) и широкой полосой (2-3 км) интенсивных пликативных деформаций пород, в пределах которой породы падают под крутыми углами, а иногда и опрокинуты. Амплитуда смещения по разлому достигает 3-4 км. Плоскость смещения падает на запад под углом 50-60°. Разрывное нарушение имеет длительную историю развития с неоднократными обновлениями. Омолаживание взброса происходило и в четвертичное время. Сейсмичность территории по данным детального сейсмического районирования оценивается в 8 баллов [21].

Физико-механические свойства грунтов. В результате анализа показателей физических свойств грунтов, определенных лабораторными методами, их пространственной изменчивости, а также данных о геолого-литологическом строении, на вскрытую глубину до 2 м выделено 4 инженерногеологических элемента (ИГЭ) (рис. 5, 6). Пятый инженерно-геологический элемент выделен по результатам геофизических исследований и результатам предыдущих изысканий.

Вскрытые грунты представлены связными грунтами четвертичного возраста и элювием метаморфических сланцев, дезинтегрированных до размеров глыб и щебня с песчано-глинистым заполнителем.

Грунтовые воды не встречены ни в одной горной выработке.

ИГЭ-1 – почвенно-растительный слой, мощность – 0,15 м.

ИГЭ-2 – суглинок делювиальный, коричневый, тугопластичный, легкий, с дресвой и щебнем до 30 %. Развит по всему разрезу, мощность слоя изменяется от 0,35 до 0,75 м. Залегает в интервале глубин от 0,15 до 0,9 м.

ИГЭ-3 – щебенистый грунт, делювиальный, с дресвой и супесчаным заполнителем твердой консистенции (некоторые пробы характеризуются по показателю текучести как пластичные, но, в основном твердые). Щебень малопрочный. Развит по всему разрезу, мощность слоя изменяется от 0,3 до 0,7 м. Залегает в интервале глубин от 0,5 до 1,4 м.

ИГЭ-4 – элювиальный грунт – специфический грунт – метаморфический сланец, дезинтегрированный до размеров глыб и щебня с песчано-глинистым заполнителем. Мощность элювия по данным геофизических исследований составляет 0,5–1,0 м. Кровля элемента залегает в интервале глубин от 0,8 до 1,4 м. ИГЭ-5 – сланец скальный, выветрелый, средней прочности, трещиноватый, размягчается в воде. Подстилает элювиальный грунт и выделен по результатам геофизических исследований. Кровля элемента залегает в интервале глубин от 1,5 до 2,2 м. Мощность – более двух метров.



Рис. 5. Внешний вид грунтов от первого до четвертого ИГЭ (шурф № 3, глубина 2 м)

Fig. 5. Appearance of soils from the first to fourth layer (pit  $\mathcal{N}$  3, depth 2 m)



Рис. 6. Схематичный инженерно-геологический разрез с отражением истинного угла наклона залегания инженерно-геологических элементов и их мощности

Fig. 6. Schematic engineering-geological section with reflection of the true angle of incidence of engineering geological elements and their capacity

Специфические грунты. К специфическим грунтам на исследуемой территории относятся элювиальные грунты (ИГЭ-4) – метаморфический сланец, дезинтегрированный до размеров глыб и щебня с песчано-глинистым заполнителем. Мощность элювия по данным геофизических исследований составляет 0,5–1,0 м. Кровля грунтов залегает в интервале глубин от 1,1 до 1,4 м.

Грунт подвержен физико-химическому выветриванию, обусловленному взаимодействию горных пород с водой.



Рис. 7. Залегание грунтов на границе «делювий-элювий»

Fig. 7. Occurrence of soils at the deluvium-eluvium boundary

Элювиальные грунты вскрыты во всех шурфах. Породы имеют хорошо выраженную слоистость и трещиноватость, при вскрытии сохраняют устойчивое положение в стенке выработки, но легко разбиваются при ударе кайлом на мелкие частицы, включая пылевато-песчаные.

В этой связи следует отметить, что в период изысканий уделено мало внимания изучению элювиальных грунтов. Более того, они чаще всего объединены в «делювиально-элювиальные», что недопустимо по требованию руководящих документов [22]. Это связано с тем, что при прохождении скважин границу делювиальных и элювиальных отложений отследить весьма сложно, практически невозможно, так как элювиальные отложения легко разбиваются буровым инструментом и при извлечении полностью теряют природную структуру и текстуру и, соответственно, принимаются за щебень и дресву с песчано-глинистым заполнителем. Глубина залегания элювиальных грунтов по ранее выполненным работам оценена в пределах 5-7 м.

Вместе с тем граница «делювий-элювий» очень хорошо выражена и легко прослеживается при вскрытии шурфами (рис. 7). На фотографии эта граница так заметна, что не требует дополнительных усилий для ее выделения. Она прослеживается на глубине 1,1–1,4 м. Также наблюдается единое структурно-текстурное строение горных пород в массиве геологической структуры. И это строение демонстрирует хорошую связь элювиальных грунтов с материнским основанием.

По геофизическим данным подошва элювиальных грунтов имеет невыдержанный характер – на отдельных участках она находится ближе к делювиальным отложениям, а на других – несколько отдаляется от них, увеличивая мощность элювия. То есть, залегание нижней границы элювиальных грунтов обусловлено глубиной развития экзогенной трещиноватости в материнских породах.

Следовательно, в сложившихся геологических условиях формирование поверхности скольжения по подошве элювиальных грунтов, так же как и внутри их самих, исключается. Делювиальные грунты закономерно смещаются по кровле элювия под действием сил гравитации (что хорошо заметно на представленной фотографии – рис. 7). И именно эта граница рассматривается нами как поверхность скольжения потенциальных оползневых образований.

#### Расчет коэффициентов устойчивости склонов

Для расчета коэффициента устойчивости склона была использована формула Маслова по методике касательных сил для прислоненного откоса при отсутствии грунтовых вод (ноябрь-декабрь 2017 г.):

$$K_{y} = \frac{\sum (P_{i} \cos \alpha_{i} \operatorname{tg} \varphi_{i} + c_{i} l_{i})}{\sum (P_{i} \sin \alpha_{i} + Q_{ci})}$$

где  $P_i$  – полный вес одного из отсеков, на которые разбивается оползневой блок;  $P_i = \gamma_i l_i h_{\rm cp.i}$ ;  $\gamma$ ,  $\gamma_i$  – удельный вес грунта (индекс «*i*» обозначает номер рассматриваемого отсека);  $l_i$  – длина подошвы или основания отсека (длина плоской поверхности скольжения);  $h_{\rm cp.i}$  – средняя толщина оползневого грунта в рассматриваемом отсеке;  $\alpha_i$  – угол наклона подошвы отсека к горизонту (угол наклона плоской поверхности скольжения);  $c_i$ ,  $\varphi_i$  – удельное сцепление и угол внутреннего трения (параметры сопротивления сдвигу или сдвиговые характеристики) в уровне подошвы отсека (по поверхности скольжения в данном отсеке);  $Q_{\rm ci}$  – сейсмическая сила.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дудлер И.В., Хайме Н.М., Лярский С.П. Методология инженерных изысканий для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 2. С. 115–129.
- Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проекти-

 $Q_{c}=\mu P$ ,

где $\mu$ – коэф<br/>фициент динамической сейсмичности.

## Северный склон

На участке обследования развития оползневых процессов наблюдаются выдержанные инженерногеологические условия: уклон поверхности склона имеет равномерное снижение – без резких перепадов высот, выделенные инженерно-геологические элементы также имеют выдержанную мощность и физико-механические характеристики в разрезе.

Поверхность скольжения определяется геологическим строением склона – делювиальные грунты сползают по коренным породам, представленным метаморфическими сланцами, кровля которых представляет собой слой элювиальных грунтов (ИГЭ-4).

В связи с такой выдержанностью условий не имеет смысла разбивать склон на отдельные призмы – он рассматривается как единый потенциально подвижный блок со следующими параметрами:  $\gamma - 2,2$  г/см<sup>3</sup>;  $h_{\rm ep} - 1,25$  м; ширина блока принята равной 1 м;  $l_i - 122,8$  м;  $\alpha_i - 26,5^{\circ}$ ; c - 0,015 МПа;  $\varphi - 35^{\circ}$ ;  $\mu - 0,05$  – для средних грунтовых сейсмических условий при сейсмичности 8 баллов.

В результате расчетов представленных значений по вышеуказанной формуле получили коэффициент устойчивости  $(K_y)$ , равный **1,27**.

Склон устойчив.

Южный склон

 $\gamma - 2,2$  г/см<sup>3</sup>;  $h_{cp} - 1,05$  м; ширина блока принята равной 1 м;  $l_i - 191,8$  м;  $\alpha_i - 14,8^\circ$ ; c - 0,015 МПа;  $\varphi - 35^\circ$ ;  $\mu - 0,05 - для$  средних грунтовых сейсмических условий при сейсмичности 8 баллов.  $K_v=2,21$ . Склон устойчив.

Западный склон

 $\gamma - 2,2$  г/см<sup>3</sup>;  $h_{cp} - 1,3$  м; ширина блока принята равной 1 м;  $l_i - 188,68$  м;  $\alpha_i - 21,8^\circ$ ; c - 0,015 МПа;  $\varphi - 35^\circ$ ;  $\mu - 0,05 - для$  средних грунтовых сейсмических условий при сейсмичности 8 баллов.  $K_v$ =1,45. Склон устойчив.

#### Заключение

По результатам мониторинговых исследований развития склоновых процессов на объектах СТК «Горный воздух» – Северный склон, Южный и Западный склоны – выполнено уточнение инженерногеологических разрезов склонов и произведен расчет коэффициента устойчивости склонов по методике касательных сил для прислоненного откоса при отсутствии грунтовых вод – все склоны устойчивы.

рования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С. 111–125.

Landslide management in the UK - the problem of managing hazards in a «low-risk» environment / A.D. Gibson, M.G. Culshaw, C. Dashwood, C.V.L. Pennington // Landslides. - 2013. - V. 10 (5). - P. 599-610.

- Крестин Б.М., Мальнева И.В. Активность оползневого и селевого процессов на территории Большого Сочи и ее изменения в начале XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 1. – С. 58–66.
- Осипов В.И., Мамаев А.А., Ястребов А.А. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 6. – С. 530–537.
- Семикина С.С., Сотников П.В. Оценка оползневой опасности береговых склонов на территории города Барнаул // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 67–75.
- Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.
- Castellanos B.A., Brandon T.L., VandenBerge D.R. Use of fully softened shear strength in slope stability analysis // Landslides. – 2016. – V. 13 (4). – P. 697–709.
- Chen D., Wei W., Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis // Earth-Science Review. – 2017. – V. 173. – P.109–121.
- Mulargia F., Visconti G., Geller R.J. Scientific principles and public policy // Earth-Science Review. 2018. V. 176. P. 214-221.
- Roy S., Baruah A., Misra N.S. Mandal Effects of bedrock anisotropy on hillslope failure in the Darjeeling-Sikkim Himalaya: an insight from physical and numerical models // Landslides. – 2015. – V. 12 (5). – P. 927–941.
- Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels // Soil Mechanics and Foundation Engineering. - 2010. - V. 47. - № 3. - P. 92-95.
- 13. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence

While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. –  $N \ge 43. - 6$  p.

- Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: a case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event / Y. Tian, C. Xu, J. Chen, Q. Zhou, L. Shen // Landslides. – 2017. – V. 14 (6). – P. 1915–1927.
- Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan / C-Y. Tsou, M. Chigira, Y. Matsushi, N. Hiraishi, N. Arai // Landslides. - 2017. - V. 14 (6). - P. 1901-1914.
- Walsby J.C. Geosure: a bridge between geology and decision making // Communicating Environmental Geoscience. – London, UK: Geological Society, 2008. – P. 81–87.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 34. Сахалинская область. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 483 с.
- Геология СССР. Т. 33. Остров Сахалин. М.: Недра, 1970. 431 с.
- Гидрогеология СССР. Т. XXIV. Остров Сахалин. М.: Недра, 1972. – 344 с.
- Мелкий В.А., Осипенко А.Б., Ильин В.В. К вопросу о первичной природе метаморфических пород острова Сахалина // Тез. докл. конф. молодых ученых-вулканологов. – Петропавловск-Камчатский, 1985. – С. 23.
- Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 5. – С. 93–103.
- 22. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. СП-11-105-97. Ч.ІІІ. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. – М.: Госстрой, 2004. – 80 с.

Поступила 05.06.2018 г.

## Информация об авторах

*Ильин В.В.*, старший преподаватель кафедры строительства Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета.

*Сахаров В.А.*, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Сахалинского государственного университета.

#### UDC 551.4.04

## CALCULATION OF STABILITY OF SLOPES IN THE AREAS OF CONSTRUCTION OF SPORTS AND TOURIST COMPLEX «GORNY VOZDUKH» (MOUNTAIN BOLSHEVIK, YUZHNO-SAKHALINSK)

## Vladimir V. Ilin<sup>1</sup>,

vladimirilyin7@gmail.com

## Valeriy A. Sakharov<sup>1</sup>,

sakhsakh@yandex.ru

#### <sup>1</sup> Sakhalin State University,

290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia.

**The relevance** of the researches is caused by the need of safety ensuring in functioning of STK «Gorny vozdukh» objects. On sloping parts of the STK there is a danger of landslide processes. The first stage of specialized monitoring was performed to assess the dynamics of development of landslide processes in places of mass accumulation of people in the STK functioning.

**The aim** of the research is to study the dynamics of landslide processes and to assess the stability of slopes in places with a large number of holidaymakers and athletes for their safety.

**Objects:** Northern, Southern and Western slopes of Bolshevik mountain; soil composing the upper part of the lithosphere to a depth of 10 meters; groundwater.

**Methods:** relevant research in the cross stretch of the slope – route reconnaissance survey, excavation of test pits up to two meters deep (full passage deluvial sediments and the autopsy eluvial rocks), sampling of undisturbed structure with the interval of 0,2–0,3 m, geophysical investigation by ground penetrating radar scanning using a mobile GPR setup OKO-2, laboratory testing of selected soil samples. Groundwater is not detected within the research process.

**Results.** According to the research in November–December 2017 at three sites of STK «Gorny vozdukh» – the Northern, Southern and Western slopes – the authors have selected the representative sites on slopes, made specification of engineering-geological section of the listed slopes, in particular the position of the border «deluvium–eluvium», made the calculation of engineering-geological elements and the coefficients of stability of slopes within the studied plots according to the method of tangential forces for propped against the slope in the absence of groundwater.

#### Key words:

*Slope, slope processes, landslide processes, deluvial deposits, eluvium, soil volumetric weight, angle of internal friction, slope of sliding surface, groundwater, seismicity of the territory.* 

#### REFERENCES

- Dudler I.V., Khayme N.M., Lyarskiy S.P. Metodologiya inzhenernykh izyskaniy dlya osobo opasnykh tekhnicheski slozhnykh i unikalnykh obyektov [Methodology of engineering surveys for especially dangerous, technically complex and unique objects]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2013, no. 2, pp. 115–129.
- Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. Complex analysis of the results of engineering surveys for the design, construction and operation of structures in areas with slope processes. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125. In Rus.
- Gibson A.D., Culshaw M.G., Dashwood C., Pennington C.V.L. Landslide management in the UK – the problem of managing hazards in a «low-risk» environment. *Landslides*, 2013, vol. 10 (5), pp. 599-610.
- Krestin B.M., Malneva I.V. Activity of landslide and mudflow processes in the territory of Greater Sochi and its changes at the beginning of the XXI century. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2015, no. 1, pp. 58–66. In Rus.
- Osipov V.I., Mamaev A.A., Yastrebov A.A. Assessment and ranking by the degree of landslide hazard of sites for construction of Olympic facilities in the city of Sochi. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2013, vol. 6, pp. 530–537. In Rus.
- Semikina S.S., Sotnikov P.V. Assessment of landslide hazard of the coastal slopes in the city of Barnaul. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 67–75. In Rus.
- 7. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayan-

dinskoe oil and gas field – Lensk. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.

- Castellanos B.A., Brandon T.L., Vanden Berge D.R. Use of fully softened shear strength in slope stability analysis. *Landslides*, 2016, vol. 13 (4), pp. 697–709.
- Chen D., Wei W., Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta-analysis. *Earth-Science Review*, 2017, vol. 173, pp. 109–121.
- Mulargia F., Visconti G., Geller R.J. Scientific principles and public policy. *Earth-Science Review*, 2018, vol. 176, pp. 214–221.
- Roy S., Baruah A., Misra S., Mandal N. Effects of bedrock anisotropy on hillslope failure in the Darjeeling-Sikkim Himalaya: an insight from physical and numerical models. *Landslides*, 2015, vol. 12 (5), pp. 927–941.
- Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 92–95.
- 13. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, no. 43, 6 p.
- Tian Y., Xu C., Chen J., Zhou Q., Shen L. Geometrical characteristics of earthquake-induced landslides and correlations with control factors: a case study of the 2013 Minxian, Gansu, China, Mw 5.9 event. *Landslides*, 2017, vol. 14 (6), pp. 1915–1927.
- Tsou C-Y., Chigira M., Matsushi Y., Hiraishi N., Arai N. Coupling fluvial processes and landslide distribution toward geomorphological hazard assessment: a case study in a transient landscape in Japan. *Landslides*, 2017, vol. 14 (6), pp. 1901–1914.

- Walsby J.C. Geosure: a bridge between geology and decision making. *Communicating Environmental Geoscience*. London, UK, Geological Society, 2008. pp. 81–87.
- Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1-6. Vyp. 34. Sakhalinskaya oblast [Scientific and Applied Handbook on the Climate of the USSR. Series 3. Perennial data. P. 1-6. Iss. 34. The Sakhalin area]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 483 p.
- Geologiya SSSR. T. 33. Ostrov Sakhalin [Geology of the USSR. Vol. 33. Sakhalin Island]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 431 p.
- Gidrogeologiya SSSR. T. XXIV. Ostrov Sakhalin [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXIV. Sakhalin Island]. Moscow, Nedra Publ., 1972. No. 2, 344 p.
- 20. Melkiy V.A., Osipenko A.B., Ilin V.V. K voprosu o pervichnoy prirode metamorficheskikh porod ostrova Sakhalina [To the issue

of the primary nature of the metamorphic rocks of the Sakhalin Island]. *Tezisy dokladov konferentsii molodykh uchenykh-vulkanologov* [Proc. of the Conference of young scientists-volcanologists]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1985. p. 23.

- Levin B.V., Kim Ch.U., Solovyev V.N. Seismic hazard assessment and results of detailed seismic zoning for cities is. Sakhalin. *Pacific Geology*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 93–103. In Rus.
- 22. Svod pravil po inzhenernym izyskaniyam dlya stroitelstva. SP-11-105-97. Ch. III. Pravila proizvodstva rabot v rayonakh rasprostraneniya spetsificheskikh gruntov [Code of rules for engineering surveys for construction. SP-11-105-97. P. III. Rules for works in areas of distribution of specific soils]. Moscow, Gosstroy Publ., 2004. 80 p.

Received: 5 June 2018.

#### Information aboit the authors

Vladimir V. Ilin, senior teacher, Sakhalin State University.

Valeriy A. Sakharov, Cand. Sc., head of the laboratory, Sakhalin State University.
УДК: 504.064:550.42(574.41)

# ИНДИКАТОРЫ ЯДЕРНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К БЫВШЕМУ СЕМИПАЛАТИНСКОМУ ИСПЫТАТЕЛЬНОМУ ПОЛИГОНУ

## Джамбаев Мерей Тлеуканович<sup>1</sup>,

merei-semei@mail.ru

## Барановская Наталья Владимировна<sup>1</sup>,

natalya.baranovs@mail.ru

### Липихина Александра Викторовна<sup>2</sup>,

a.v.lipikhina@mail.ru

### Боев Владислав Викторович<sup>1</sup>,

v.-3@mail.ru

## Райымкулова Мадина Кумарбеккызы<sup>2</sup>,

madina rk@bk.ru

## Апсаликова Зухра Сансызбаевна<sup>3</sup>,

zingatinovazs@mail.ru

## Судыко Александр Федорович<sup>1</sup>,

afs@tpu.ru

- <sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
- <sup>2</sup> Научно-исследовательский институт радиационной медицины и экологии некоммерческого акционерного общества «Медицинский университет Семей», Казахстан, 071400, г. Семей, ул. Гагарина, 258.
- <sup>3</sup> Государственный Университет им. Шакарима, Казахстан, 071400, г. Семей, ул. Глинки, 20а.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью выявления индикаторных свойств химического состава компонентов природной среды, локальных и региональных особенностей их состава с учетом природных и антропогенных факторов воздействия в целях проведения экологической оценки и районирования на территориях, испытывающих специфическое воздействие объектов ядерного техногенеза. Экологическое районирование исследуемых территорий ранее проводилось только с учетом дозовых нагрузок населения, полученного в результате деятельности бывшего Семипалатинского испытательного полигона. В этой связи необходимо изучение природной геохимической специфики, что позволило бы более точно подходить к вопросу экологической оценки изучаемых территорий с учетом комплексного воздействия природных и техногенных факторов. **Цель:** комплексное изучение элементного состава компонентов природной среды на территории, прилегающей к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону.

**Объекты:** компоненты природной среды (почва, солевые отложения питьевой воды, продукты питания, биологические объекты). **Методы.** Комплекс компонентов природной среды отбирался в жилых дворах – максимально сближено во времени и пространстве. Главным критерием при выборе исследуемых жилых дворов был факт проживания респондентов в них не менее 10 лет. После соответствующей подготовки образцы отобранных компонентов исследовались с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа.

**Результаты**. Показаны результаты комплексного изучения элементного состава компонентов природной среды (почва, солевые отложения питьевой воды), биологических объектов и продуктов питания на территориях, испытывающих воздействие бывшего Семипалатинского испытательного полигона. В исследуемых компонентах природной среды установлены элементы-индикаторы воздействия ядерного техногенеза, а также региональная специфика химического состава природной среды исследуемой территории в целом, проявляющаяся в накоплении U и Zn.

#### Ключевые слова:

Накопление химических элементов, геохимические ряды накопления, коэффициенты концентрации, компоненты природной среды, индикаторы ядерного техногенеза.

#### Введение

За период функционирования с 1949 по 1991 гг. Семипалатинский испытательный полигон (СИП) оказал мощное техногенное влияние на окружающую среду путём радиоактивного загрязнения прилегающих территорий долгоживущими радионуклидами, тяжёлыми металлами, нарушения естественных геохимических циклов миграции химических элементов в природной среде, а также путем изменения геологической среды, разрушения и преобразования рельефа. Радиационное загрязнение окружающей среды - ключевой фактор техногенного воздействия деятельности бывшего СИП, которое носит «хронический» характер. В связи с этим становится необходимым проведение мониторинговых исследований. При этом важными аспектами радиоэкологической оценки являются ранжирование территории по уровню загрязнения, выявление путей миграции загрязняющих компонентов в природных системах. На сегодняшний день прошло около 30 лет со дня закрытия СИП. С учетом естественных процессов миграции и распада радионуклидов становится актуальной задача выявления индикаторов, достоверно указывающих на радиационное воздействие по следовым показателям. Следует учитывать, что радиационное загрязнение прилегающей территории при ядерных испытаниях является неоднородным, что создает необходимость создания линейной сетки опробования в разном направлении от источника.

Современные исследования, проведенные как непосредственно на самом полигоне, так и на территории вокруг него, направлены на изучение механизмов миграции, накопления элементов и их изотопов в отдельных средах, а также других отдаленных поствзрывных эффектов ядерных и других испытаний. Так, изучены формы нахождения трития в почвах испытательного участка «Балапан» Семипалатинского полигона [1]. Установлено, что <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am, <sup>239+240</sup>Pu могут генерироваться как в грубых, так и в мельчайших фракциях почвы [2]. Рассчитаны коэффициенты переноса радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am, <sup>239+240</sup>Pu в системе почва – растительный покров [3]. Результаты исследований открытых водных объектов, расположенных на территории СИП, показали, что радиоактивное загрязнение некоторых поверхностных водных объектов происходило в результате вымывания загрязнённой почвы местности, на которых она образовалась [4]. Последние исследования показали, что интенсивность миграции радионуклидов в поверхностных водах определяется их формами нахождения. Так, показано, что <sup>137</sup>Сѕ в воде мигрирует в коллоидной и растворенной формах, <sup>90</sup>Sr – преимущественно в растворенной форме. Фракционирование <sup>239+240</sup>Ри характерно для каждого исследованного водоема на территории СИП [5]. Согласно результатам последних исследований, подземные ядерные испытания могут стать причиной землетрясений, которые периодически продолжаются после проведенных испытаний [6]. Отмечено, что изменения геологической среды также несут потенциальную опасность негативного воздействия на окружающую среду путем активации геофизических процессов, сопровождающихся выделением токсичных и горючих газов. Так, на участках расположения эпицентров подземных ядерных испытаний наблюдаются аномальные температуры подземных вод, что может отражать воздействие геодинамических и природно-техногенных процессов, вызванных подземными ядерными испытаниями [7].

Одной из главных задач является радиоэкологическая оценка территории, прилегающей к СИП. Так, проведен комплексный радиоэкологический мониторинг территорий, расположенных вблизи СИП, где объектами исследования являлись: почва, растения и продукты питания местного производства. В данных компонентах оценены удельные активности радионуклидов, таких как<sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs и <sup>239/240</sup> Ри [8, 9]. Также оценены активности <sup>137</sup>Сs в почве, воде, растительности и коровьем молоке в 10 точках трех регионов (Абай, Аягуз и Урджар) которые расположены к юго-востоку от СИП [10]. Показано, что содержание техногенных радионуклидов в продуктах сельскохозяйственного производства на территории, прилегающей к СИП, варьируют в пределах  $n \cdot 10^{-2} - n \cdot 10^{0}$  Бк/кг, а в почве не превышают уровней глобальных выпадений [11].

В последнее время наряду с объектами окружающей среды в качестве индикаторов радиоактивного воздействия изучаются и биосубстраты человека. Так, в качестве индикаторов радиоактивного воздействия, связанного с профессиональной деятельностью, применяются ногти и волосы человека [12]. В ранее проведенных нами исследованиях было показано, что одним из источников поступления урана в кровь жителей населенных пунктов, расположенных на территориях, прилегающих к СИП, является питьевая вода и отмечена целесообразность детального изучения биогеохимических условий миграции урана в системе окружающая среда – организм человека [13].

Одним из важных аспектов изучения последствий ядерных испытаний, проведенных на Семипалатинском испытательном полигоне, является его отдалённые эффекты на здоровье населения, проживающего на прилегающей территории [14]. Отмечается, что несмотря на то, что современная радиоэкологическая обстановка территорий Алтайского края, которые также были подвержены радиационному загрязнению в результате деятельности СИП, не имеет ограничений для проживания и хозяйственной деятельности, к 2017 г. уровень общей заболеваемости местного населения значительно вырос [15]. Детальные результаты последних исследований различных аспектов радиационного загрязнения территории, прилегающей к бывшему СИП, приведены в работах Л.П. Рихванова, Н.В. Барановской, Т.Ж. Мулдагалиева, А.В. Липихиной, А.В. Аклеева, В.Ф. Степаненко, М. Hoshi, M. Yamamoto, N.Y. Mudie, N. Kawano [16-22 и др.].

Таким образом, результаты многочисленных работ показывают, что геохимическая обстановка территории, прилегающей к СИП, характеризуется высокой неоднородностью. Население, проживающее на данной территории, активно использует земельные ресурсы в целях ведения личного подсобного хозяйства. Отмечены поступления некоторых химических компонентов в организм человека. Все эти факты говорят о необходимости комплексного подхода для установления закономерности миграции химических элементов и выявления элементов индикаторов влияния СИП.

#### Материалы и методы

Материалами для исследования послужили пробы объектов окружающей среды, такие как почва, полынь холодная (Artemisia frigida), солевые отложения питьевой воды, мышечной ткани крупнорогатого скота, молока, а также биосубстратов человека, таких как волосы и кровь. Объектами исследования были выбраны населенные пункты Бодене, Долонь, Канонерка, Новопокровка, Зенковка, Саржал, Медеу, Караул и Кокпекты (фоновая территория) Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан. Данные территории отнесены к разным зонам радиационного риска, которые установлены в соответствии с законодательством Республики Казахстан (рис. 1) [23].



Примечание: синим цветом отмечена чрезвычайная зона, красным – максимальная зона, коричневым – повышенная зона радиационного риска, зеленым – минимальная зона радиационного риска, желтым – территория с льготным социально экономическим статусом [23], • – опробованные населенные пункты

Note: blue marked the zone of extraordinary radiation risk, red marked the zone of maximum radiation risk, brown noted the exceeding zone of radiation risk, green noted the minimum zone of radiation risk, yellow marked the territory with the preferential social and economic status [23],  $\bullet$  – localities where samples were taken

- Puc. 1. Обзорная карта отбора проб в населенных пунктах, расположенных на территориях, прилегающих к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону
- Fig. 1. Overview map of sampling in settlements located in the territories adjacent to the former Semipalatinsk test site

В каждом исследуемом населенном пункте комплексному пробоотбору подверглись 10 дворов. В каждом дворе отбирали по возможности весь комплекс исследуемых компонентов. Одним из важных критериев при выборе исследуемых дворов, был факт проживания респондентов на рассматриваемой территории не менее 10 лет. В итоге было отобрано 53 пробы почвы, 16 проб мышечной ткани крупнорогатого скота, 25 – коровьего молока, 27 – солевых отложений, 26 – растений (полынь холодная), 60 проб крови человека и 50 проб волос человека. Уровень накопления химических элементов определен методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в ядерно-геохимической лаборатории, на базе исследовательского ядерного реактора Национального исследовательского Томского политехнического университета (аналитик с.н.с. А.Ф. Судыко). В целях проведения сравнительного анализа элементного состава почв использованы данные по условному фону, полученные на территории Тюменского федерального заказника в 2017-2018 гг. Отбор и подготовка проб осуществлена с применением стандартных методических рекомендаций. Пробу почвы отбирали методом конверта до глубины 0,05 м. Первичная масса пробы составляла 500-600 г. Пробу помещали в бумажный пакет. При пробоподготовке почва была просеяна через 2 мм сито и измельчена с применением виброистирателя. Солевые отложения отбирали из бытовой нагревательной посуды путем постукивания или ножом. Пробы крови и волос отобраны с согласия респондентов. Все пробы, за исключением почвы, помещалась в герметично закрывающийся полиэтиленовый пакет, а кровь и молоко - в вакуумные пробирки и стеклянные герметичные сосуды, соответственно. Первичная масса отобранных проб исследуемых компонентов, за исключением почвы, варьирует в пределах 10-50 г (10 и 50 мл крови и молока, соответственно). Все пробы, за исключением почвы и волос, подвергали высушиванию в муфельной печи при соответствующих температурах, до сухого состояния, и озолению мышечной ткани животных и полыни до состояния золы. После высушивания (озоления) все пробы, за исключением волос, истирали в агатовой ступке и пакетировали в алюминиевую фольгу размером 3,5×3,5 см, предварительно обработанной этиловым спиртом. Методика подготовки проб волос включала процедуры промывания от внешних загрязнителей и измельчения. Проба промывалась попеременно в ацетоне (50 мл) и дистиллированной воде (50 мл) два раза по две минуты. Высушивание пробы происходило при комнатной температуре в течение не менее 20 часов. Пробу измельчали до длины фрагментов 2–5 мм и упаковывали в алюминиевую фольгу размером 3,5×3,5 см.

#### Результаты исследования и обсуждение

С помощью инструментального нейтронно-активационного анализа в составе почвы были определены содержания таких химических элементов, как: Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U. По результатам анализа проведен расчет статистических параметров содержания химических элементов в почвах изученной территории. Рассчитаны такие показатели, как: среднее арифметическое значение (m), геометрическое среднее (G), медиана ( $X_{med}$ ), стандартная ошибка среднего ( $\sigma$ ), стандартное отклонение (S), коэффициент вариации ( $K_{\rm B}$ ), минимальное значение (min) и максимальное значение (max) (табл. 1). Видно, что содержание химических элементов в составе почвы исследуемой территории подчиняется нормальному закону распределения. Коэффициенты вариации таких элементов, как: Ca, Br, Rb, Sr, Sb, Cs, Nd, Eu, Tb, Ta, Au, варьируют в диапазоне от 50 до 100 %, что соотвествует высокой неоднородности их распределения. Концентрации Ag были ниже пределов обнаружения во всех пробах.

На рис. 2 приведена диаграмма сравнения элементного состава почвы исследуемой территории с почвой Томской области (TO), как территории со схожей техногенной нагрузкой, определенной воздействием ядерного техногенеза, а также с почвой Тюменского федерального заказника (TФЗ), установленной нами как условно фоновая [24].

Видно, что элементный состав почв территории, прилегающей к СИП и Томской области имеют схожую специфику, которая проявляется в более высоком содержании всех элементов, за исключением Аи, по сравнению с территорией Тюменского федерального заказника. Учитывая тот факт, что типы почв, определяемые природными условиями Томской области и Восточно-Казахстанской области, на которой расположен СИП, отличаются, можно предположить, что специфика их элементного состава определяется воздействием одинакового техногенного фактора. Кроме того, очень низкие концентрации практически всех химических элементов в составе почвы Тюменского федерального заказника характеризует территорию как не загрязненную, что позволяет рассматривать ее в дальнейшем как фоновую территорию. Анализ нормированных показателей относительно кларковых содержаний химических элементов по А.А. Ярошевскому [25] подтверждает вывод о наличии схожей картины накопления химических элементов на территориях воздействия ядерного техногенеза (Предприятие ядерно-топливного цикла Сибирского химического комбината в Томской области и Территория СИП) (рис. 3).

Таблица 1. Статистические показатели химических элементов в почвах территории, прилегающей к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону (N=53)

Table 1.Statistical indicators of chemical elements in soils of the<br/>territory adjacent to the former Semipalatinsk test site<br/>(N=53)

	m	σ	G	$X_{ m med}$	S	min	max	K <sub>B</sub>
Na	15549	352	2560	15100	2560	9900	23083	16
Ca	20686	1514	11020	18100	11020	1200	52800	53
Sc	10,8	0,5	3,4	11,1	3,4	4,4	19,6	31
Cr	75,4	2,9	21	81,0	21,4	7,0	106	28
Fe	31104	1216	8856	31400	8856	13955	54858	28
Co	12,0	0,8	5,7	12,7	5,7	0,1	25,2	48
Zn	205	12,4	90	210	90,1	52,3	391	44
As	5,7	0,3	2	5,6	2,5	1,4	11,1	43
Br	12,8	1,2	8,8	145	8,8	0,5	42,4	69
Rb	67,4	5,1	37	70,4	37,3	2,5	193	55
Sr	175	17,7	132	145	129	60,0	510	73,8
Ag	<1	-	-	-	-	-	-	-
Sb	1,0	0,1	1,0	70,4	1,0	0,03	5,0	93
Cs	2,8	0,2	1,4	0,9	1,4	0,1	4,5	51
Ba	437	15,5	113	3,3	113	27,4	684	26
La	22,9	0,7	5,0	450	5,0	8,6	31,2	22
Ce	49,9	2,0	14,2	22,6	14,2	1,5	68,9	29
Nd	16,2	1,5	11,0	51,6	11,0	0,5	49,5	68
Sm	4,5	0,2	1,1	19,9	1,1	2,3	7,8	25
Eu	0,9	0,1	0,5	4,4	0,5	0,01	2,2	55
Tb	0,6	0,05	0,4	1,1	0,4	0,03	1,3	64
Yb	2,5	0,08	0,6	0,7	0,6	0,8	$^{3,5}$	24
Lu	0,4	0,01	0,1	2,4	0,1	0,2	0,5	22
Hf	5,2	0,2	1,6	0,4	1,6	2,1	8,0	31
Та	0,7	0,07	0,5	4,9	0,5	0,01	2,6	80
Au	0,01	0,003	0,02	0,8	0,02	0,001	0,2	334
Th	6,8	0,3	2,5	0,001	2,5	2,6	16,8	37
U	2,6	0,1	0,7	6,4	0,7	0,1	4,2	28

Примечание: т – среднее,  $\sigma$  – стандартная ошибка среднего, G – геометрическое среднее,  $X_{med}$  – медиана, S – стандартное отклонение, тіп – минимум, тах – максимум,  $K_n$  – коэффициент вариации, < – ниже указанного предела обнаружения.

Note: m is the mean,  $\sigma$  is the standard error of mean, G is geometric mean,  $X_{med}$  is the median, S is the standard deviation, min – minimum, max – maximum,  $K_s$  is the coefficient of variation, < – below the stated detection limit.

Для территории, прилегающей к СИП, существует деление по степени радиационного риска.



**гис. 2.** Сравнательные оанные сооержаная хамаческах элементов в почвах локальных терраториа, м

Fig. 2. Comparative data of chemical elements content in soils of local territories, mg/kg



Территория, прилегающая к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону Territory adjacent to the former Semipalatinsk test site



Тюменский федеральный заказник Tyumen Federal reserve

Нами рассмотрена концентрация химических элементов в почвах данных зон. На рис. 4 приведены коэффициенты концентраций химических элементов в почвах территорий, прилегающих к СИП, ранжированных по уровню радиационного риска, относительно кларка по А.А. Ярошевскому [25].

Для почвы чрезвычайной зоны радиационного риска характерно накопление Na, Sc, Zn и U (4 элемента). Для почвы максимальной зоны радиационного риска – Na, Ca, Sc, Cr, Co, Zn, Lu, Th и U (9 элементов). В почве территории с повышенным уровнем радиационного риска накапливается максимальный спектр элементов, таких как Na, Ca, Sc, Cr, Co, Zn, As, Rb, Sb, Cs, Ce, Sm, Eu, Tb, Lu, Ta, Th и U (18 элементов). Специфика элементного состава почвы данной территории отражается в накоплении Rb, Ce, Sm, Tb, Ta. Для почвы минимальной зоны радиационного риска характерно накопление Na, Ca, Sc, Cr, Co, Zn, As, Sr, Sb, Cs, Eu и U (12 элементов). Специфичным для почвы данной территории является накопление Sr. Суммарные показатели загрязнения сравниваемых территорий не соответствуют их рангам, установленным по уровню радиационного риска. Максимальный



Tomsk region

- Puc. 3. Коэффициенты концентраций химических элементов в почвах территории, прилегающей к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону, относительно кларка по А.А. Ярошевскому [25]
- Fig. 3. Coefficients of concentrations of chemical elements in soils of the territory adjacent to the former Semipalatinsk test site, relative to clark by A.A. Yaroshevsky [25]

уровень суммарных показателей загрязнения характерен для почв с повышенной и минимальной зонами радиационного риска. Элементами, одинаково значимо (КК≥1) накапливающимися во всех зонах радиационного риска, являются Na, Sc, Zn и U. Учитывая тот факт, что коэффициенты вариации Na, Zn, Sc и U ниже 50 %, можно сделать вывод о природности специфики накопления данных химических элементов в составе почв исследуемой территории в целом. Согласно методическим рекомендациям по уровню коэффициентов вариаций  $\leq$ 50 % различают однородный характер распределения содержания химических элементов [26].

В целях выявления индикаторных компонентов, отражающих природную и техногенную геохимическую специфику исследуемой территории, изучен элементный состав комплекса различных объектов, в том числе биосубстратов человека. В табл. 2 приведены основные параметры накопления химических элементов в составе полыни холодной, молока, мышечной ткани животных, солевых отложений питьевой воды (накипи), крови и волос человека, отобранных на данной территории.



Чрезвычайная зона радиационного риска,  $Z_{CII3}$ =6,9 Zone of extraordinary radiation risk,  $Z_{TPI}$ =6,9



Повышенная зона радиационного риска,  $Z_{\text{СПЗ}}$ =9,2 Zone of extraordinary radiation risk,  $Z_{\text{ТРI}}$ =9,2



Максимальная зона радиационного риска,  $Z_{CII3}$ =7,2 Zone of maximum radiation risk,  $Z_{TPI}$ =7,2



Минимальная зона радиационного риска,  $Z_{CII3}$ =12,2 Zone of maximum radiation risk,  $Z_{TPI}$ =12,2

- Рис. 4. Коэффициенты концентрации химических элементов в почвах территорий, прилегающих к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону, ранжированных по уровню радиационного риска, относительно кларка по А.А. Ярошевскому [25]
- Fig. 4. Coefficients of concentrations of chemical elements in soils of territories adjacent to the former Semipalatinsk test site, ranked by the radiation risk level, relative to Clark by A.A. Yaroshevsky [25]

Сравнительный анализ уровней накопления химических элементов в составе исследованных сред позволяет выявить объекты, которые выполняют функцию концентраторов, являясь возможным источником поступления определенных элементов в организм человека. Видно, что основным концентратором Ca, Cr, Fe, Co, Zn, As, Sr, Sb, Ba, Nd, Lu, Ta, U является накипь. Полынь является концентратором Sc, Br, Rb, Cs, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Hf и Th. Для остальных биологических объектов характерны небольшие вариации макрокомпонентов и относительно одинаковые содержания редкоземельных элементов.

В табл. 3 приведены биогеохимические ряды накопления химических элементов в компонентах природной среды и биосубстратах человека. Коэффициенты концентраций были рассчитаны для почв территории, прилегающей к СИП, относительно кларка по А.А. Ярошевскому [25], для солевых отложений питьевой воды относительно солевых отложений воды озера Байкал, вода которой принята как эталон чистой воды [27], для крови человека относительно данных по G.V. Iengar и др. [28], для волос человека относительно среднего на территории Павлодарской области Республики Казахстан по данным Н.П. Корогод [29], для полыни относительно состава покрытосеменных видов растений по H.J.M. Bowen [30], для молока относительно элементного состава организма млекопитающих по H.J.M. Bowen [30], для тканей животных относительно мускульных тканей млекопитающих по H.J.M. Bowen [30]. Из таблицы видно, что общей чертой всех рассматриваемых компонентов природной среды и биосубстратов человека является накопление U. Кроме того, коэффициенты концентрации Zn≥1 в составе почти всех рассматриваемых сред, за исключением молока. Суммарные показатели накопления химических эл-

Таблица 2. Химические элементы в составе компонентов природной среды территории, прилегающей к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону, мг/кг

	Полынь холодная	Молоко	Мышечная ткань	Накипь	Кровь человека	Волосы человека
	Wormwood	Milk	животных	Salt deposits	Human blood	Human hair
	(Artemisia frigida) (n=26)	( <i>n</i> =25)	Animal muscle tissue $(n=16)$	( <i>n</i> =27)	( <i>n</i> =53)	( <i>n</i> =50)
	$\frac{(1 - 20)}{1101 \pm 132}$	2173 + 165	5190 + 457	148 ± 18,0	$6477 \pm 240$	$792 \pm 120$
Na	40 - 4827	$\frac{1130 - 4210}{1130 - 4210}$	2570 - 9501	6.0 - 402	2300 - 10565	$\overline{74.0 - 3623}$
	$22712 \pm 3470$	$6623 \pm 339$	$152 \pm 38$	$237719 \pm 9604$	$231 \pm 30,0$	1859 + 255
Са	1781 - 65030	$\frac{-}{3730 - 10938}$	37.0 - 447	-94400 - 322400	$\overline{20.0 - 1243}$	340 - 8920
	$0.9 \pm 0.1$	$0.01 \pm 0.002$	$0.004 \pm 0.001$	$0.2 \pm 0.05$	0.002 + 0.0003	$0.02 \pm 0.003$
Sc	$\frac{0,1}{0,1-2,6}$	$\frac{0.0004 - 0.03}{0.0004 - 0.03}$	$\frac{0.0002 - 0.01}{0.0002 - 0.01}$	$\frac{0.03 - 1.1}{0.03 - 1.1}$	0.0002 - 0.01	0.001 - 0.1
	$3,6 \pm 0,9$	$2,0 \pm 0,7$	$0,3 \pm 0$	$18,6 \pm 4,3$	$0,7 \pm 0,3$	0,001 0,1
Cr	$\frac{1}{0.3 - 14.0}$	$\frac{1}{0.3 - 9.9}$	$\frac{1}{0.3 - 0.3}$	$\frac{1}{0.2 - 86.0}$	$\frac{1}{0.02 - 17.4}$	<0,3
_	2473 + 516	$428,3 \pm 49,4$	736 ± 207	$2664 \pm 1057$	1974 + 52.0	620 ± 86,1
Fe	150 - 8238	3.0 - 990	70.0 - 2820	$\overline{20.0 - 28243}$	500 - 3328	$\frac{150 - 3728}{150 - 3728}$
	1.5 + 0.2	$0,2 \pm 0,02$	$0.8 \pm 0.04$	$28,0 \pm 10,0$	$0.1 \pm 0.02$	$1,0 \pm 0,1$
Co	$\frac{-1}{04} = 39$	$\frac{0.0 - 0.0}{0.1 - 0.5}$	$\frac{0.5 - 1.2}{0.5 - 1.2}$	$\frac{0.02 - 175}{0.02 - 175}$	$\frac{0.002 - 1.3}{0.002 - 1.3}$	$\frac{74}{01-28}$
_	$250 \pm 35,2$	$35,7 \pm 1,9$	$194 \pm 14,0$	$1845 \pm 319$	$23,2 \pm 1,0$	$174 \pm 15,2$
Zn	56.4 - 630	$\overline{20.4 - 56.4}$	38.1 - 279	45.0 - 6829	4.1 - 49.4	$\overline{14.0 - 512}$
	1,1 ± 0,3	$0,4 \pm 0,04$	0,8 ± 0,08	$12,0 \pm 2,1$	$0,3 \pm 0,03$	$0,3 \pm 0,03$
As	0.01 - 5.3	0.02 - 0.5	0.06 - 1.0	0.3 - 34.0	0.005 - 0.5	0.03 - 0.7
D.,	38,2 ± 9,7	16,5 ± 1,7	34,7 ± 2,3	6,0 ± 0,4	6,2 ± 0,4	2,6 ± 0,4
Dſ	0,05 - 186	7,1 - 37,0	22,6 - 50,9	0,8 - 10,0	1,8 - 17,0	0,3 - 13,0
D1	23,6 ± 3,1	3,9 ± 0,2	13,3 ± 1,6	1,0 ± 0,3	5,8 ± 0,2	0,3 ± 0,04
KU	6,7 - 70,8	2,1 - 6,5	6,0 - 26,0	0,03 - 7,0	2,1-11,1	0,02 - 1,6
Sr.	210 ± 35,6	2,9 ± 0,8	$10,0 \pm 0$	2922 ± 358	1,1 ± 0,3	9,3 ± 1,8
51	30 - 634	0,5 - 13,0	10,0 - 10,0	339 - 6026	0,5 - 8,3	3,0 - 47,0
Ασ	$0,2 \pm 0,004$	$0,03 \pm 0,003$	$0,08 \pm 0,01$	<0.05	$0,04 \pm 0,004$	<0.05
115	0,2 - 0,3	0,002 - 0,1	0,05 - 0,2	-0,05	0,01 - 0,1	-0,05
Sb	$0,2 \pm 0,03$	$0,1 \pm 0,03$	$0,01 \pm 0,003$	$0,4 \pm 0,2$	$0,02 \pm 0,004$	< 0.01
	0,002 - 0,5	0,003 - 0,6	0,005 - 0,05	0,04 - 3,2	0,003 - 0,2	0.01 + 0.000
Cs	$0,2 \pm 0,1$	$0,03 \pm 0,003$	$\frac{0.02 \pm 0.005}{0.005}$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,001$	$\frac{0,01 \pm 0,002}{0.001 \pm 0.002}$
	0,003 - 0,9	0,001 - 0,005	0,006 - 0,1	0,0002 - 0,1	0,0004 - 0,03	0,001 - 0,1
Ba	$\frac{56,0 \pm 15,0}{50,0 \pm 10,0}$	$\frac{3,0 \pm 0,0}{0.5 \pm 10.2}$	$\frac{4,5 \pm 0,5}{0.6 \pm 0.5}$	$\frac{154 \pm 10,0}{21.4 \pm 407}$	$\frac{2,0 \pm 0,3}{0.1 - 14.0}$	$\frac{5,5 \pm 0,0}{1.0 - 1.02}$
	5,9 - 230 61 + 0.6	0,5 - 10,3 0.04 + 0.01	0,6 - 5,0 0.06 + 0.01	31,4 - 487 05 ± 01	0,1 - 14,0 0.1 + 0.07	1,0 - 16,2 0.2 + 0.03
La	17 120	$\frac{0,01}{0,002}$ 0.22		$\frac{0,5 \pm 0,1}{0.01 - 2.0}$	$\frac{0,1}{0,01}$	$\frac{0.2 + 0.03}{0.02 + 1.2}$
	$\frac{1,7 - 13,0}{4,0 + 0.6}$	0.003 - 0.22 0.2 + 0.03	0,008 - 0,2 0.7 + 0.2	0,01 - 2,0 0.8 + 0.2	0.01 - 4.0 0.3 + 0.2	0,02 - 1,5 0.7 + 0.1
Ce	$\frac{1}{05-113}$	$\frac{0.02 \pm 0.000}{0.05 - 0.5}$	$\frac{0,1}{0,03-3,0}$	$\frac{0.03 - 3.2}{0.03 - 3.2}$	$\frac{0.001}{0.001} = 12.0$	$\frac{0,1}{0,1-3,4}$
	$1,5 \pm 0,3$	$0,03$ $0,05$ $0,06$ $0,2 \pm 0,06$	$0,03 \pm 0,05$	$2,8 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,1$	0,1 = 3,4 $0,3 \pm 0,1$
Nd	$\frac{1}{04-49}$	$\frac{1}{0.02 - 1.4}$	$\frac{1}{0.0003 - 0.8}$	$\frac{1}{02-47}$	$\frac{1}{0.01 - 6.2}$	$\frac{1}{0.05 - 2.2}$
G	$0,4 \pm 0,1$	$0,08 \pm 0,02$	0,08 ± 0,02	$0,1 \pm 0,03$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,002$
Sm	0,02 - 1,4	0,003 - 0,34	0,008 - 0,3	0,001 - 0,7	0,0005 - 0,9	0,001 - 0,1
En	0,05 ± 0,01	0,01 ± 0,001	$0,005 \pm 0,001$	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,003	0,004 ± 0,001
Eu	0,001 - 0,3	0,003 - 0,04	0,0007 - 0,01	0,001 - 0,04	0,0001 - 0,2	0,001 - 0,04
Th	$0,1 \pm 0,01$	0,01 ± 0,002	0,01 ± 0,002	0,03 ± 0,02	$0,01 \pm 0,002$	0,005 ± 0,001
10	0,002 - 0.2	0,001 - 0,03	0,003 - 0,03	0,002 - 0,4	0,0002 - 0,1	0,001 - 0,03
Yh	$0,2 \pm 0,04$	$0,004 \pm 0,001$	$0,08 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,006$	$0,01 \pm 0,001$
10	0,01 - 0,7	$0,0002 - 0,0\overline{2}$	0,003 - 0,1	0,002 - 0,2	0,0003 - 0,3	0,002 - 0,04
Lu	$0,02 \pm 0,005$	$0,002 \pm 0,001$	$0,001 \pm 0,0001$	$0,1 \pm 0,01$	$0,001 \pm 0,0001$	$0,004 \pm 0,001$
	0,001 - 0,1	0,001 - 0,01	0,0005 - 0,002	0,003 - 0,1	0,0002 - 0,003	0,001 - 0,02
Hf	$0,4 \pm 0,1$	$\frac{0.01 \pm 0.003}{0.002}$	$\frac{0.01 \pm 0.006}{0.0000}$	$0,1 \pm 0,02$	$0,003 \pm 0,001$	$\frac{0.01 \pm 0.003}{0.000 \pm 0.003}$
Та	0.03 - 1.3	0,002 - 0,07	0,0002 - 0,1	0,003 - 0,5	0,001 - 0,04	0,0004 - 0,2
	$\frac{0,05 \pm 0,01}{0.004 - 0.2}$	$\frac{0.01 \pm 0.001}{0.002}$	$0,01 \pm 0,003$	$\frac{0,1 \pm 0,04}{0.01 \pm 1.0}$	$0,003 \pm 0,0004$	$\frac{0.01 \pm 0.0003}{0.002}$
	0,004 - 0,2 0.02 + 0.005	0,003 - 0,01 0.003 + 0.001	0,0004 - 0,04 0,001 + 0,0002	0,01 - 1,0 0.01 + 0.002	0,0001 - 0,01	0,003 - 0,02 0.1 + 0.02
Au		$\frac{0,000 \pm 0,001}{0,0001}$	0.0002 0.002	$0,01 \pm 0,002$	0,001 1 0,0003	$\frac{0,1}{0,001}$
Th	0,001 - 0,1 0.8 + 0.1	0.001 - 0.01	0.002 - 0.003	0.001 - 0.03	0.0002 - 0.02 0.01 + 0.007	0.001 - 0.7 0.01 + 0.002
	$\frac{0.03 - 2.3}{0.03 - 2.3}$	$\frac{0,01}{0,001} = 0.02$	0.007 - 0.1	$\frac{0,05}{0.005} - 0.5$	$\frac{0,01}{0,001} = 0.1$	$\frac{0,01}{0,001} = 0.1$
	0,03 - 2,3 $0,2 \pm 0.1$	$0.04 \pm 0.01$	$0,05 \pm 0.004$	$22,3 \pm 2.0$	$0.03 \pm 0.008$	$0.5 \pm 0.07$
U	$\frac{0.004 - 1.0}{0.004 - 1.0}$	$\frac{0.001 - 0.3}{0.001 - 0.3}$	$\frac{0.0004}{0.0004} = 0.1$	$\frac{7.2}{3.2-41.0}$	0.001 - 0.4	$\frac{0.003 - 12}{0.003 - 12}$
-	-,,-	-, 0,0	0,0001 011		-,,.	,,,,,, The

Table 2. Chemical elements in the components of the environment of the treeitory adjacent to the former Semipalatinsk test site, mg/kg

Примечание: < – ниже указанного предела обнаружения; в числителе – среднее арифметическое содержание ± стандартная ошибка среднего, в знаменателе – минимальное и максимальное значение.

Note: < - below the specified detection limit; in the numerator – the arithmetic mean  $\pm$  the standard error of the mean, in the denominator – minimum and maximum value

ементов, концентрируемых ≥1, максимальны для полыни и накипи, что подтверждает вывод о том, что данные компоненты являются основными концентраторами химических элементов. Следующей средой, активно накапливающей химические элементы, является кровь человека. Далее следуют волосы человека и мышечная ткань животных. Для молока характерен минимальный показатель накопления, равный 24. Почва является средой, концентрирующей химические элементы в наименышей степени. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее чувствительным компонентом, реагирующим на состояние окружающей среды накапливанием химических элементов, является живой организм.

Анализ коэффициентов концентрации элементов в изучаемых компонентах, полученных при нормировании к единому кларку, показал, что наблюдается занижение значений всех показателей, поскольку кларк является весьма специфичным для многих из изучаемых компонентов [31]. Можно отметить сохранение закономерности концентрирования цинка для всех компонентов природной среды территории, прилегающей к бывшему испытательному полигону. Уран концентрируется выше единицы в таких средах, как накипь и почва. Вероятно, невысокие показатели коэффициента концентрации для урана в биологических объектах связаны с высоким кларковым показателем, не учитывающим эти среды.

### Заключение

Природная геохимическая специфика элементного состава почв территории, прилегающих к СИП, выражается в накоплении Na, Sc, Zn и U. Территории, расположенные наиболее удаленно от СИП, отличаются максимальной химической загруженностью. Суммарные показатели загрязнения почв территорий, ранжированных по уровням дозовых нагрузок, максимальны для почв с повышенным и минимальным уровнем радиационного риска.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Serzhanova Z.B., Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Timonova L.V., Raimkanova A.M. Researching of tritium speciation in soils of «Balapan» site // Journal of environmental radioactivity. 2018. V. 192. P. 621-627.
- Kabdyrakova A.M., Lukashenko S.N., Mendubaev A.T., Kunduzbayeva A.Y., Panitskiy A.V., Larionova N.V. Distribution of artificial radionuclides in particle-size fractions of soil on fallout plumes of nuclear explosions // Journal of environmental radioactivity. - 2018. - V. 186. - P. 45-53.
- Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Y., Panitskiy A.V., Ivanova A.R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the semipalatinsk test site //Journal of environmental radioactivity. - 2018. - V. 186. - P. 63-70.
- Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Polevik V.V. Radionuclide transport in the «sediments – water – plants» system of the water bodies at the Semipalatinsk test site //

Таблица 3. Биогеохимические ряды накопления химических элементов в компонентах природной среды и биосубстратов человека, проживающего на территориях, прилегающих к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону

Table 3.	Biogeochemical series of accumulation of chemical ele-
	ments in the components of the natural environment and
	biosubstrates of a person living in the territories adja-
	cent to the former Semipalatinsk test site

Компонент прироной среды Component of environment	Биогеохимические ряды Biogeochemical series	Суммарный пока- затель накопления Total accumula- tion index
Почва Soil	$\begin{array}{l} \underline{Zn_{3,4}Na_{2,5}U_{1,7}Ca_{1,5}Sc_{1,4}Co_{1,3}Cr_{1,3}}\\ Lu_{1,1}Sb_{1,1}Th_{1,0}Ce_{1,0}Rb_{1,0}As_{1,0}\\ Cs_{1,0}Sm_{1,0}Eu_{1,0}Ba_{1,0}Tb_{1,0}Yb_{1,0}\\ Fe_{1,0}Sr_{1,0}\end{array}$	$\substack{\text{Z}_{\text{CIIH}}=6,9\\\text{Z}_{\text{TPI}}=6,9}$
Накипь Salt deposits	$\frac{Zn_{115}Ta_{7,3}\textbf{U}_{4,9}Lu_{3,5}Tb_{3,2}Nd_{2,9}As_{2,8}}{Cr_{2,2}Fe_{1,8}Sr_{1,8}Co_{1,5}Eu_{1,1}Sb_{1,1}Ca_{1,0}}$	$\begin{array}{c} \mathrm{Z_{CIIH}=137}\\ \mathrm{Z_{TPI}=137} \end{array}$
Полынь холодная Wormwood (Artemisia frigida)	$\begin{array}{c} Yb_{211,}Sc_{111,}Au_{81,}La_{72,}Sm_{69,}Tb_{67,}\\ Fe_{18,}Cr_{16,}Sr_{8,}\textbf{U}_{5,6}As_{5,5}Ba_{4,1}Co_{3,2}\\ Ag_{2,6}Sb_{2,6}Br_{2,5}Eu_{2,2}Zn_{1,6} \end{array}$	$\substack{ \mathrm{Z}_{\mathrm{CIIH}} = 665 \\ \mathrm{Z}_{\mathrm{TPI}} = 665 }$
Молоко Milk	$\begin{array}{c} Cr_{13,6}Ag_{4,9}Br_{4,1}Fe_{2,7}\textbf{U}_{2,0}As_{1,8}\\ Ba_{1,3}Sc_{1,2} \end{array}$	$\begin{array}{c} Z_{C\Pi H} = 24 \\ Z_{TPI} = 24 \end{array}$
Мышечная ткань животных Animal muscle tissue	$\begin{array}{c} Ag_{13,2}Br_{8,7}Fe_{4,6}As_{4,2}Co_{2,8}U_{2,2}\\ Ba_{2,0}Cr_{2,0}Ce_{1,5}\overline{Zn_{1,2}}Rb_{1,0}Na_{1,0} \end{array}$	$\substack{\text{Z}_{\text{CIIH}}=32\\\text{Z}_{\text{TPI}}=32}$
Кровь человека Human blood	$\begin{array}{l} Sr_{21,2}As_{11,2}Ba_{9,2}\textbf{U}_{5,8}Fe_{4,3}Na_{3,1}\textbf{Z}n_{3,1}\\ Ca_{2,7}Th_{2,3}Sb_{2,2}Rb_{2,2}Au_{1,5}Br_{1,2}Cs_{1,0} \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathrm{Z_{CIIH}=57}\\ \mathrm{Z_{TPI}=57} \end{array}$
Волосы человека Human hair	$\frac{Fe_{14}Co_{10}Ce_5Sc_3Rb_3Na_2La_2\textbf{U}_2Lu_1}{Ca_1Ta_1Au_1\textbf{Zn}_1}$	$Z_{C\Pi H} = 34$ $Z_{TPI} = 34$

Примечание: красным цветом выделены химические элементы, имеющие общую специфику накопления для всех рассматриваемых сред.

Note: chemical elements with common accumulation specificity in all studied media are highlighted in red.

Накипь и полынь холодная (Artemisia frigida) являются основными концентраторами химических элементов, в том числе отражающих природную геохимическую специфику территории в целом, которая выражается в накоплении Zn и U почти во всех исследованных компонентах. Наиболее чувствительными индикаторами, активно концентрирующими химические элементы, являются живые системы.

Journal of environmental radioactivity. - 2018. - V. 184. - P. 122-126.

- Торопов А.С. Фракционирование форм нахождения техногенных радионуклидов в водных объектах семипалатинского испытательного полигона // Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 74–84.
- Triggered seismicity after north Korea's 3 September 2017 nuclear test / J. Yao, D. Tian, Z. Lu, L. Sun, L. Wen // Seismol Res Lett. - 2018. - V. 89. - № 6. - P. 2085-2093.
- Тепловые особенности в районе «боевой» скважины 104 семипалатинского испытательного полигона / В.В. Романенко, Д.Е. Аюнов, А.Д. Дучков, С.А. Казанцев // Интерэкспо гео-сибирь. – 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 123–128.
- Radioecological monitoring of adjacent territories to the former Semipalatinsk nuclear test site, east Kazakhstan / S. Duyssembaev, A. Serikova, S. Suleimenov, N. Ikimbayeva, A. Zhexenaye-

va, A. Akhemtzhanova, Z. Atambayeva // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – V. 7. – P. 323–328.

- Дюсембаев С.Т., Серикова А.Т., Иминова Д.Е. Содержание америция-241 и цезия-137 в пробах окружающей среды и продуктах животноводства // Молодой ученый. – 2017. – № 6.1. – С. 11–17.
- Kakimov A., Yessimbekov Z., Kakimova Z., Bepeyeva A., Stuart M. Cs-137 in milk, vegetation, soil, and water near the former soviet Union's Semipalatinsk Nuclear Test Site //Environmental Science and Pollution Research. - 2016. - V. 23. - № . 5. -P. 493-497.
- Кожаханов Т.Е., Лукашенко С.Н. Содержание радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239-240</sup>Pu и <sup>241</sup>Am в продукции растениеводства на территориях, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – № 2. – С. 2205–2225.
- Brown J.W.N., Brockman J.D., Robertson J.D. Measurement of <sup>239</sup>Pu in keratinous materials: A potential non-invasive bioassay for monitoring human exposure // Applied Radiation and Isotopes. - 2017. - V. 128. - P. 132-135.
- 13. Джамбаев М.Т., Жакупова Ш.Б., Брайт Ю.Ю. Уран в питьевой воде и крови человека в зоне влияния Семипалатинского ядерного полигона // 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: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – С. 122–124.
- The state scientific automated medical registry, Kazakhstan: an important resource for low-dose radiation health research / K.N. Apsalikov, A. Lipikhina, B. Grosche, T. Belikhina, E. Ostroumova, S. Shinkarev, V. Stepanenko, T. Muldagaliev, S. Yoshinaga, T. Zhunussova, M. Hoshi, H. Katayama, D.T. Lackland, S.L. Simon, A. Kesminiene // Radiat Environ Biophys. – 2019. – V. 58. – № 1. – P. 1–11.
- Колядо И.Б., Плугин С.В., Трибунский С.И. Последствия влияния радиационного воздействия на территорию и население Алтайского края // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97. – № 7. – С. 609–617.
- Очерки геохимии человека / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова, Д.В. Наркович, О.А. Денисова. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 377 с.
- Muldagaliev T., Apsalikov K., Belihina T. Scientific foundations of screening organization of the state of health of Kazakhstanean population subjected to radiation, analyses of the results, development prenozological preventive measures and rehabilitation // 17<sup>th</sup> Hiroshima International Symposium. – Япония, 2012. – 43 p.
- 18. Липихина А.В. Радиоэкологическая обстановка и оценка дозовых нагрузок от долговременного воздействия радионуклидов в районе Семипалатинского испытательного ядерного полигона: на примере Абайского района: автореф. дис.... канд. биол. наук. Томск, 2005. 163 с.
- Аклеев А.В. Реакция тканей на хроническое воздействие ионизирующего излучения // Радиационная биология. Радиоэ-

кология. – 2009. – № 1. – С. 5–17.

- International intercomparison of retrospective luminescence dosimetry method: sampling and distribution of the brick samples from dolon' village, Kazakhstan / V.F. Stepanenko, E.K. Iaskova, T.V. Kolizshenkov, I.G. Kryukova, M. Hoshi, M. Yamamoto, A. Sakaguchi, J. Takada, H. Sato, K.N. Apsalikov, B.I. Gusev, H. Jungner // Journal of Radiation Research. 2006. V. 47. № . Suppl\_A. P. 15-21.
- Reconstruction of local fallout composition and gamma-ray exposure in a village contaminated by the first USSR nuclear test in the Semipalatinsk nuclear test site in Kazakhstan / M. Yamamoto, K. Kawai, A. Sakaguchi, M. Hoshi, N. Chaizhunusova, K. Apsalikov // Radiation and Environmental Biophysics. 2010. № 4. P. 673–684.
- Twinning in the offspring of parents with chronic radiation exposure from nuclear testing in Kazakhstan / N.Y. Mudie, A.J. Swerdlow, M.J. Schoemake, B.I. Gusev, L.M. Pivina, S. Chsherbakova, A. Mansarina, Y. Jakovlev, K.N. Apsalikov, S. Bauer // Radiation Research. - 2010. - № 6. - P. 829-836.
- 23. Закон Республики Казахстан от 18 декабря 1992 года № 1787-XII «О социальной защите граждан, пострадавших вследствие ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне URL: http://online.zakon.kz/ (дата обращения 03.03.2019).
- 24. Боев В.В., Перминова Т.С., Барановская Н.В. Распределение микро- и макроэлементов в почвах Томской области // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы II Международной школы-семинара для молодых исследователей, посвященной памяти профессора В.Б. Ильина. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2016. – С. 197–200.
- Ярошевский А.А. Кларки геосфер. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. С. 7–14.
- Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. І. Математические основы. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 103 с.
- 27. Геохимическая характеристика солевых отложений питьевых вод Байкальского региона / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, Т.Т. Тайсаев, Н.В. Барановская // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 209–223.
- Iyengar G.V., Kollmer W.E., Bowen H.J.M. The elemental composition of human tissues and body fluids. - Weinheim; New York: Verlag Chemie, 1978. - 7 p.
- 29. Элементный состав волос детского населения города Павлодар / Н.П. Корогод, Б.Х. Шайморданова, Г.Е. Асылбекова, Н.В. Барановская // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2008. – Т. 8. – № 4. – С. 99–109.
- Bowen N.J.M. Trace elements in biochemistry. London; New York: Academic Press, 1966. - 241 p.
- Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высш. шк., 1988. – 327 с.

Поступила: 02.04.2019 г.

### Информация об авторах

Джамбаев М.Т., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Липихина А.В.*, кандидат биологических наук, профессор Российской Академии естествознания, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института радиационной медицины и экологии некоммерческого акционерного общества «Медицинский университет Семей». *Боев В.В.*, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Райымкулова М.К.*, стажер-исследователь Научно-исследовательского института радиационной медицины и экологии некоммерческого акционерного общества «Медицинский университет Семей».

*Апсаликова З.С.*, докторант кафедры технологии пищевых продуктов и изделий легкой промышленности Государственного Университета им. Шакарима г. Семей.

*Судыко А.Ф.*, инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC: 504.064:550.42(574.41)

# INDICATORS OF NUCLEAR TECHNOGENESIS ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORIES ADJACENT TO THE FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE

Merey T. Jambayev<sup>1</sup>,

merei-semei@mail.ru

Natalya V. Baranovskaya<sup>1</sup>,

natalya.baranovs@mail.ru

Aleksandra V. Lipikhina<sup>2</sup>, a.v.lipikhina@mail.ru

## Vladislav V. Boev<sup>1</sup>,

v.-3@mail.ru

# Zukhra S. Apsalikova<sup>3</sup>,

zingatinovazs@mail.ru

## Madina K. Raiymkulova<sup>2</sup>,

madina rk@bk.ru

# Alexander F. Sudyko<sup>1</sup>,

afs@tpu.ru

- <sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia.
- <sup>2</sup> Research Institute of Radiation Medicine and Ecology of Non-Profit Joint-Stock Company «Semey Medical University», 258, Gagarin street, Semey, 071400, Kazakhstan.
- <sup>3</sup> Shakarim State University of Semey, 20a, Glinky street, Semey, 071400, Kazakhstan.

**The relevance** of the research is determined by the need to identify the indicator properties of chemical composition of the natural environment components, local and regional characteristics of their composition, taking into account natural and anthropogenic factors of influence in order to conduct environmental assessment and areas subdivision effected by nuclear technogenesis. Environmental zoning of the study areas was carried out only taking into account the dose loads of the population obtained as a result of the activities of the former Semipalatinsk test site. In this regard, it is necessary to study the natural geochemical specifics, which would allow a more accurate approach to the issue of environmental assessment of the studied areas, taking into account the complex impact of natural and man-made factors

**The main aim** of the research is the complex study of the elemental composition of the environment components in the territory adjacent to the former Semipalatinsk Test Site

**Object** of the research is the components of the environment (soil, salt deposits of drinking water, plant), food, biological objects. **Methods.** Complex of environmental components was sampled in residential courtyards. The main criterion in selection of the investigated residential yards was the fact that the respondents lived there for at least 10 years. After appropriate preparation, the samples of the selected components were studied on instrumental neutron activation analysis

The paper introduces the results of a comprehensive study of elemental compositions of the environment components (soil, salt deposits of drinking water, biological objects, food products) that are in contact with them in the zone of influence of the former Semipalatinsk Test Site. Elements-indicators of the nuclear technogenesis effects were identified in the studied environment samples as a regional specificity of the chemical composition of the studied territory shown in U and Zn accumulation.

### Key words:

Accumulation of chemical elements, geochemical accumulation series, concentration coefficients, components of environment, indicators of nuclear technogenesis.

## REFERENCES

- Serzhanova Z.B., Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N., Timonova L.V., Raimkanova A.M. Researching of tritium speciation in soils of «Balapan» site. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, Vol. 192, pp. 621–627.
- Kabdyrakova A.M., Lukashenko S.N., Mendubaev A.T., Kunduzbayeva A.Y., Panitskiy A.V., Larionova N.V. Distribution of ar-

tificial radionuclides in particle-size fractions of soil on fallout plumes of nuclear explosions. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. pp. 45–53.

 Larionova N.V., Lukashenko S.N., Kabdyrakova A.M., Kunduzbayeva A.Y., Panitskiy A.V., Ivanova A.R. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the semipalatinsk test site. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. 186, pp. 63–70.

- Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Polevik V.V. Radionuclide transport in the «sediments-water-plants» system of the water bodies at the Semipalatinsk test site. Journal of environmental radioactivity, 2018, vol. 184, pp. 122–126.
- Toropov A.S. Fractionation of technogenic radionuclides species in water bodies of Semipalatinsk test site. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2018. Vol. 329, no 6, pp. 74–84. In Rus.
- Yao J., Tian D., Lu Z., Sun L., Wen L. Triggered seismicity after north Korea's 3 September 2017 nuclear test. *Seismol Res Lett*, 2018, vol. 89, no. 6, pp. 2085–2093.
- Romanenko V.V., Aiunov D.E., Duchkov A.D., Kazantsev S.A. Teplovye osobennosti v rayone «boevoy» skvazhiny 104 semipalatinskogo ispytatelnogo poligona [Thermal features in the area of «combat» bore 104 of the Semipalatinsk test site]. *Interexpo GEO-Siberia*, 2017, vol. 2, no. 4, pp. 123–128.
- Duyssembaev S., Serikova A., Suleimenov S., Ikimbayeva N., Zhexenayeva A., Akhemtzhanova A., Atambayeva Z. Radioecological monitoring of adjacent territories to the former Semipalatinsk nuclear test site, east Kazakhstan. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 7, pp. 323–328. In Rus.
- 9. Dyusembaev S.T., Serikova A.T., Iminova D.E. Content of americium-241 and cesium-137 in environmental samples and animal products. *Young scientist*, 2017, no. 6.1, pp. 11–17. In Rus.
- Kakimov A., Yessimbekov Z., Kakimova Z., Bepeyeva A., Stuart M. Cs-137 in milk, vegetation, soil, and water near the former soviet Union's Semipalatinsk Nuclear Test Site, Environmental Science and Pollution Research, 2016, Vol. 23, no. 5, pp. 493-497.
- 11. Kozhanov T.E., Lukashenko S.N. Soderzhanie radionuklidov <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu i <sup>241</sup>Am v produktsii rastenievodstva na territoriyakh, prilegayushchikh k Semipalatinskomu ispytatelnomu poligonu [The content of radionuclides <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu and <sup>241</sup>Am in production of crops in the areas adjacent to the Semipalatinsk test site]. *Radiation biology. Radioecology*, 2017, no. 2, pp. 220–225.
- Brown J.W.N., Brockman J.D., Robertson J.D. Measurement of <sup>239</sup>Pu in keratinous materials: A potential non-invasive bioassay for monitoring human exposure. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, vol. 128. pp. 132–135.
- 13. Dzhambaev M.T., Zhakupova Sh.B., Brayt Yu. Yu. Uran v pitevoy vode i krovi cheloveka v zone vliyaniya Semipalatinskogo yadernogo poligona [Uranium in drinking water and human blood in the zone of influence of Semipalatinsk nuclear test site]. Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashhennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Problems of Geology and exploitation of mineral resources. Proc. of the XX International Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists, dedicated to the 120<sup>th</sup> anniversary of the founding of Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016. pp. 122–124.
- 14. Apsalikov K.N., Lipikhina A., Grosche B., Belikhina T., Ostroumova E., Shinkarev S., Stepanenko V., Muldagaliev T., Yoshinaga S., Zhunussova T., Hoshi M., Katayama H., Lackland D.T., Simon S.L., Kesminiene A. The state scientific automated medical registry, Kazakhstan: An important resource for low-dose radiation health research. *Radiat Environ Biophys*, 2019, vol. 58, no. 1, pp. 1–11.
- 15. Kolyado I.B., Plugin S.V., Tribunsky S.I. Posledstviya vliyaniya radiatsionnogo vozdeystviya na territoriyu i naselenie Altayskogo kraya [Aftereffects of radiation exposure impact on the territory and the population of the Altai krai]. *Gig Sanit*, 2018, vol. 97, no. 7, pp. 609–617.
- Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Ignatova T.N. Narkovich D.V., Denisova O.A. Ocherki geokhimii cheloveka [Essays on

Geochemistry of the human]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. 377 p.

- 17. Muldagaliev T. Apsalikov K., Belihina T. Scientific foundations of screening organization of the state of health of Kazakhstanean population subjected to radiation, analyses of the results, development prenozological preventive measures and rehabilitation.17<sup>th</sup> Hiroshima International Symposium. Japan, 2012, 43 p.
- 18. Lipikhina A.V. Radioekologicheskaya obstanovka i otsenka dozovykh nagruzok ot dolgovremennogo vozdeystviya radionuklidov v rayone Semipalatinskogo ispytatelnogo yadernogo poligona: na primere Abayskogo rayona. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Radioecological situation and assessment of dose loads from long-term exposure to radionuclides in the area of the Semipalatinsk nuclear test site: on the example of Abay district. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2005. 163 p.
- Akleev A.V. Reaktsiya tkaney na khronicheskoe vozdeystvie ioniziruyushchego izlucheniya [Tissue reaction to chronic exposure to ionizing radiation]. *Radiation biology. Radioecology*, 2009, no. 1, pp. 5–20.
- 20. Stepanenko V.F., Iaskova E.K., Kolizshenkov T.V., Kryukova I.G., Hoshi M., Yamamoto M., Sakaguchi A., Takada J., Sato H., Apsalikov K.N., Gusev B.I., Jungner H. International intercomparison of retrospective luminescence dosimetry method: sampling and distribution of the brick samples from dolon' village, Kazakhstan. *Journal of Radiation Research*, 2006, vol. 47, no. Suppl\_A, pp. 15–21.
- 21. Yamamoto M., Kawai K., Sakaguchi A., Hoshi M., Chaizhunusova N., Apsalikov K. Reconstruction of local fallout composition and gamma-ray exposure in a village contaminated by the first USSR nuclear test in the Semipalatinsk nuclear test site in Kazakhstan. Radiation and Environmental Biophysics, 2010, no. 4. pp. 673–684.
- 22. Mudie N.Y., Swerdlow A.J., Schoemake M.J., Gusev B.I, Pivina L.M., Chsherbakova S., Mansarina A., Jakovlev Y., Apsalikov K.N., Bauer S. Twinning in the offspring of parents with chronic radiation exposure from nuclear testing in Kazakhstan. *Radiation Research*, 2010, no. 6, pp. 829–836.
- 23. Zakon Respubliki Kazakhstan ot 18 dekabrya 1992 goda № 1787-XII «O sotsialnoy zashchite grazhdan, postradavshikh vsledstvie yadernykh ispytaniy na Semipalatinskom ispytatelnom yadernom poligone» [Law of the Republic of Kazakhstan No. 1787-XII of 18 December 1992 on the social protection of citizens affected by nuclear tests at the Semipalatinsk nuclear test site]. Available at: http://online.zakon.kz/ (accessed 03 March 2009).
- 24. Boev V.V., Perminova T.S., Baranovskaya N.V. Raspredelenie mikro- i makroelementov v pochvakh Tomskoy oblasti [In distribution of micro-and macroelements in soils of the Tomsk region]. Biogeokhimiya khimicheskikh elementov i soedineniy v prirodnykh sredakh. Materialy II Mezhdunarodnoy shkoly-seminara dlya molodykh issledovateley, posvyashhennoy pamyati professora V.B. Ilina [Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments. Materials of the II International school-seminar for young researchers dedicated to the memory of Professor V. B. Ilyin]. Tyumen, Tyumen state University Publ. house, 2016. pp. 197-200.
- Yaroshevsky A.A. Klarki geosfer. Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh [Clark of Geosphere. Handbook of geochemical prospecting for minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1990. pp. 7–14.
- Mikhalchuk A.A., Yazikov E.G. Mnogomerny statisticheskiy analiz ekologo-geokhimicheskikh izmereniy. Ch. I. Matematicheskie osnovy [Multivariate statistical analysis of ecological and geochemical measurements. P. I. Mathematical foundations]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. 103 p.
- Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Taysaev T.T., Baranovskaya N.V. Geochemical characteristics of salt deposits of drinking waters of the Baikal region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 209–223. In Rus.

- Iyengar G.V. Kollmer W.E., Bowen H.J.M. The elemental composition of human tissues and body fluids. Weinheim; New York, Verlag Chemie, 1978. 7 p.
- 29. Korogod N.P., Shaymordanova B.Kh., Asylbekova G.E., Baranovskaya N.V. The elemental composition of the children's hair of the city of Pavlodar. *Problems of biogeochemistry and geochemical ecology*, 2008, vol. 8, no. 4, pp. 99–109. In Rus.
- Bowen N.J.M. Trace elements in biochemistry. London-New York, Academic Press, 1966. 241 p.
- Glazovskaya M.A. Geokhimiya prirodnykh i texnogennykh landshaftov SSSR [Geochemistry of natural and man-made landscapes of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 327 p.

Received: 02.04.2019

## Information about the authors

Merey T. Jambayev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandra V. Lipikhina, Cand. Sc., professor, Research Institute of Radiation Medicine and Ecology of Non-Profit Joint-Stock Company «Semey Medical University».

Vladislav V. Boev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Madina K. Raiymkulova*, research intern, Research Institute of Radiation Medicine and Ecology of Non-Profit Joint-Stock Company «Semey Medical University».

Zukhra S. Apsalikova, doctoral student, Shakarim State University of Semey.

Alexander F. Sudyko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова Дизайн обложки Т.В. Буланова

Фотографии на обложке взяты из личного архива Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 29.04.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка». Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,75. Уч.-изд. л. 24,20. Заказ 106-19. Тираж 500 экз.



Издательство