



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 5, 2018

Издательство  
Томского политехнического университета  
2018

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

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

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

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке 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](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

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

Volume 329, № 5, 2018

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

**Editorial Board**

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

**AIMS AND SCOPE**

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).



## СОДЕРЖАНИЕ

- Оценка механических нагрузок на провода различной формы сечения класса напряжения 6–35 кВ  
Латыпов И.С., Сушков В.В., Тимошкин В.В.
- Палеоботанические особенности тюменской и наунакской свит (средняя–верхняя юра юго–востока Западной Сибири)  
Рычкова И.В., Шамина М.И.
- Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно–элементного моделирования  
Епифанова Е.А., Строкова Л.А.
- Механическое скрепление твердотопливных элементов с корпусом  
Половникова Н.В., Громов А.М., Теплова И.И.
- Способ определения термодинамических свойств веществ для изучения природных и технологических процессов методами физико–химического моделирования  
Бычинский В.А., Королева О.Н., Ощепкова А.В., Штенберг М.В.
- Сравнительное исследование понизителей фильтрации на основе карбоксиметильных эфиров крахмала и целлюлозы в современных системах буровых растворов  
Минаев К.М., Яновский В.А., Минаева Д.О., Захаров А.С., Сагитов Р.Р., Андропов М.О., Пандей С.К.
- Применение и технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов  
Нижегородов А.И., Гаврилин А.Н., Мойзес Б.Б.
- Вибродиагностические исследования на стенде цепного привода штангового скважинного насоса  
Ленков С.Н., Ямалиев В.У., Зубаиров С.Г.
- Зависимость прогиба чувствительного элемента датчика измерения давления в трубопроводе  
Мамонова Т.Е., Сидорова А.А.
- Организационные мероприятия по повышению энергоэффективности на примере нефтедобывающих предприятий Томской области  
Ильина М.Н., Ильина Г.Ф.
- Вопросы планирования и формирования инженерной инфраструктуры на территории г. Томска в условиях реформирования земельного законодательства  
Попов В.К., Студенова К.В., Козина М.В.
- Вольтамперметрическое определение палладия в медно–никелевых сульфидных рудах  
Горчаков Э.В., Переvezentseva Д.О., Вайтулевич Е.А., Ким Д.–Ч., Багамаев Б.М.
- Обоснование трендов повышения степени выработки запасов нефти нижнемеловых отложений Западной Сибири на основе идентификации объектов  
Мухаметшин В.В.
- Адсорбция нефтепродуктов и неорганических ионов на минеральном сорбенте  
Юрмазова Т.А., Шахова Н.Б., Чан Туан Хоанг, Планкина М.В.
- Пириты западного фланга Сухоложского золоторудного поля (Ленский рудный район)  
Пшеничкин А.Я., Гаврилов Р.Ю.

## CONTENTS

- 6 Assessment of mechanical loads on the overhead power transmission lines of 6–35 kV voltage class  
Latypov I.S., Sushkov V.V., Timoshkin V.V.
- 15 Paleobotanical features of Tyumen and Naunak formations (middle–upper Jurassic of the south–east of West Siberia)  
Rychkova I.V., Shaminova M.I.
- 27 Evaluation of deformation of the historic building in Tomsk by the integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling  
Epifanova E.A., Strokova L.A.
- 42 Mechanical bonding of solid propellant elements with the case  
Polovnikova N.V., Gromov A.M., Teplova I.I.
- 48 Methods of determining thermodynamic properties of substances for studying natural and technological processes by the physical–chemical modeling methods  
Bychinsky V.A., Koroleva O.N., Oshchepkova A.V., Shtenberg M.V.
- 57 Comparative research of filtration reducers based on carboximethyl esters of starch and cellulose in modern drilling mud systems  
Minaev K.M., Yanovsky V.A., Minaeva D.O., Zakharov A.S., Sagitov R.R., Andropov M.O., Pandey S.K.
- 67 Application and production technology of thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes  
Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B.
- 76 Vibrodiagnostic investigations at a chain drive stand of a sucker rod well pump  
Lenkov S.N., Yamaliev V.U., Zubairov S.G.
- 83 Dependence of a sensitive element deflection in a pressure measurement sensor in a pipeline  
Mamonova T.E., Sidorova A.A.
- 91 Organizational activities to increase energy efficiency on the example of oil–producers of enterprises in Tomsk region  
Ilina M.N., Ilina G.F.
- 99 Issues of planning and forming engineering infrastructure within the territory of Tomsk in terms of reforming land legislation  
Popov V.K., Studenova K.V., Kozina M.V.
- 108 Voltammetric determination of palladium in copper–nickel sulfide ores  
Gorchakov E.V., Perevezentseva D.O., Vaitulevich E.A., Kim J.–C., Bagamaev B.M.
- 117 Rationale for trends in increasing oil reserves depletion in Western Siberia cretaceous deposits based on targets identification  
Mukhametshin V.V.
- 125 Adsorption of petroleum substances and inorganic ions from aqueous solutions using mineral sorbent  
Yurmazova T.A., Shakhova N.B., Hoang Tran Tuan, Plankina M.V.
- 135 Pyrites of west flank of Sukholozhsky gold ore field (Lensk ore district)  
Pshenichkin A.Ya., Gavrilov R.Yu.

УДК 621.315.145:624.3.056

## ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 6–35 кВ

Латыпов Ирек Салихович<sup>1,4</sup>,  
Irek.tat.Latypov@gmail.com

Сушков Валерий Валентинович<sup>2</sup>,  
Sushkovvv@gray-nv.ru

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>3</sup>,  
timoshkinvv@tpu.ru

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625027, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70.

<sup>2</sup> Нижневартковский государственный университет,  
Россия, 628605, г. Нижневартковск, ул. Ленина, 56.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> ООО «Томский нефтяной центр»,  
Россия, 425048, г. Тюмень, ул. Максима Горького, 42.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности функционирования воздушных линий электропередачи с использованием неизолированного витого провода в распределительной сети класса напряжения 6–35 кВ при стихийных воздействиях. Развитие данного направления позволит снизить аварийные ситуации в распределительной сети, в частности, в нефтегазовой отрасли, где длины воздушных линий класса напряжения 6–35 кВ достигают нескольких десятков километров.

**Цель исследования:** обоснование влияния формы поперечного сечения витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ в зависимости от выбираемых коэффициентов заполнения полного сечения провода материалом и гладкости провода на величины вероятных механических нагрузок, действующих на провод, с учетом погодных условий.

**Объекты исследования:** витой неизолированный провод воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ.

**Методы.** При определении допустимых расчетных нагрузок использован метод предельных состояний.

**Результаты.** Получены формулы, позволяющие определять диаметр провода в зависимости от выбираемых коэффициентов заполнения полного сечения провода материалом и гладкости провода. На основе полученных выражений построены зависимости вероятных механических нагрузок, действующих на провода, от погодных условий и выбираемой формы поперечного сечения. По представленным зависимостям предложен алгоритм определения вероятных механических нагрузок, действующих на провод, который позволяет обоснованно выбрать провод воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ. Выполнена оценка критических пролетов на примере использования провода номинальным сечением 120 мм<sup>2</sup>.

### Ключевые слова:

Воздушная линия электропередачи, неизолированный провод, гололедное образование, скорость ветра, механическая нагрузка, критический пролет.

### Введение

Воздушные и кабельные линии среднего класса напряжения 6–35 кВ образуют основу распределительных сетей Российской Федерации. Общая протяженность линий данного класса напряжения, по данным ОАО «ФСК ЕЭС», составляет более 1,3 млн км [1]. Неизолированные провода воздушной линии электропередачи составляют основополагающую часть от представленной длины, поэтому требуется обеспечение их надежного функционирования с минимальными отключениями электрических потребителей [2–4]. Особенно важно обеспечить гарантированное электропитание для электроустановок, где используются наблюдатели [5].

Основными потребителями электрической энергии распределительной сети нефтегазового сектора являются объекты нефтегазодобычи (кустовые и до-

жимные насосные станции, центральные пункты сбора, товарные парки и т. д.) и кусты газовых, нефтяных и газоконденсатных скважин, которые удалены от энергетических центров и запитываются преимущественно воздушными линиями электропередачи (ВЛ), длина которых от источника электроэнергии до потребителя может достигать нескольких десятков километров. Схема электроснабжения в основном имеет «древовидную» структуру с множеством отпаек на конечные потребители.

Из-за такой разветвленной структуры в распределительной сети часто происходят аварийные отключения, связанные, прежде всего, с технологическими нарушениями, к которым относятся и аварийные отключения электрических сетей вследствие стихийных воздействий [6, 7]. По данным АО «Тюменьэнерго» [8], аварийные отключе-

ния из-за стихийных воздействий на ВЛ класса напряжения 6–35 кВ Тюменской области варьируются от 5 до 20 % в зависимости от времени года. Наибольшее количество приходится на IV и II кварталы года, когда велика вероятность гололедообразования и шквалистого ветра.

Наиболее тяжелыми последствиями обладают аварийные ситуации, связанные с гололедообразованием на поверхности проводов, так как они сопровождаются большим объемом разрушений и требуют значительного времени для восстановления функционирования ВЛ [9, 10]. Гололедно-изморозевые отложения на поверхности проводов могут вызвать сближение фазных проводов, «плюску» проводов в фазах, обрыв проводов, разрушение опор ВЛ и перекрытие изоляторов [11, 12].

В связи с вышесказанным, необходимо повышать надежность ВЛ как наиболее повреждаемого элемента электрической сети, для чего необходимо определить вероятные нагрузки, действующие на провод в зависимости от погодных условий географического района с учетом формы поперечного сечения провода ВЛ [13].

#### Определение вероятных механических нагрузок

Кратко рассмотрим силы и нагрузки, действующие на провода ВЛ. Провода ВЛ, подвешенные на опорах воздушной линии, находятся под постоянным действием равномерно распределенной по длине вертикальной статической нагрузки от собственного веса. Кроме того, на них могут действовать внешние силы, направленные вертикально (гололедно-изморозевые образования) и горизонтально (давление ветрового потока) [14, 15]. Вертикальная нагрузка от гололедно-изморозевых образований вызывает наибольшие усилия в проводах и действует не постоянно, а лишь при неблагоприятных сочетаниях атмосферных условий [16]. Такая нагрузка может существовать на поверхности проводов длительное время, поэтому ее считают основной при расчете механической прочности проводов. Нарастание гололедного образования при этом происходит постепенно и не сопровождается динамическим изменением приложенной силы, поэтому нагрузку от гололеда при расчетах принимают статической [17, 18]. Динамическим действием справедливо можно считать внезапный сброс гололеда при сильных порывах ветра или обрыва провода в смежных пролетах. Горизонтальная нагрузка от ветра, как и вертикальная нагрузка от гололеда, вызывает большие усилия в проводе. При расчетах горизонтальную нагрузку, как и вертикальную, принимают статической. Динамический эффект пульсации скоростного напора ветра не наблюдается по следующим причинам: из-за малой жесткости проводов; пульсации ветра на разных участках пролета не совпадают по амплитуде и фазе действующей силы [19].

Для количественной оценки вертикальной и горизонтальной нагрузок, действующих на провод, в статье уточнена методика определения действующих

на провода нагрузок с учетом формы поперечного сечения провода [20].

Известно, что полная вертикальная нагрузка при гололеде определяется арифметической суммой единичных нагрузок от собственного веса и веса гололеда [19, 20]:

$$P_{\text{рез. верт}} = P_{\text{пров}} + P_{\text{гол}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{пров}} = (\gamma_{\text{ст}} F_{\text{ст}} + \gamma_{\text{п}} F_{\text{п}}) \eta \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{ст}}$  – удельный вес стали;  $\gamma_{\text{п}}$  – удельный вес материала проводящей части;  $F_{\text{ст}}$  – площадь сечения стального сердечника;  $F_{\text{п}}$  – площадь сечения проволок проводящей части;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий приращение длины скрученных проволок.

$$P_{\text{гол}} = g_0 \pi c (d + c) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $g_0$  – объемный вес льда на поверхности провода;  $d$  – диаметр провода;  $c$  – толщина стенки гололеда.

Анализ формулы (2) показывает, что нагрузка от собственного веса провода определяется во многом удельным весом и сечением материала сердечника и проводящей частей, тогда как нагрузка от веса гололеда (3) зависит от диаметра провода, который определяется формой его поперечного сечения [13]:

Периметр боковой поверхности витого неизолированного провода  $P_{\text{пр}}$  определяется по выражению:

$$P_{\text{пр}} = \frac{2\sqrt{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})\pi}}{\chi_{\text{зап}} m_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $\chi_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения полного сечения провода материалом;  $m_{\text{пр}}$  – коэффициент гладкости провода, учитывающий шероховатость поверхности провода.

Выбор диаметра провода зависит от следующих условий:

- при увеличении коэффициента заполнения  $\chi_{\text{зап}}$  диаметр провода  $d_{\text{пр}}$  снижается;
- при уменьшении коэффициента гладкости  $m_{\text{пр}}$  диаметр провода  $d_{\text{пр}}$  увеличивается;
- отношение площади номинального сечения провода к площади окружности, построенной по эквивалентному радиусу  $r_{\text{экв}} = P_{\text{пр}}/2\pi$ , определяется коэффициентом площади  $k_s$ :

$$k_s = \frac{F_{\text{ст}} + F_{\text{п}}}{\pi r_{\text{экв}}^2}; \quad (5)$$

- максимальное значение периметра боковой поверхности провода, в зависимости от коэффициента площади, определяется коэффициентом формы провода:

$$k_F = e^{\log\left(\frac{1}{k_s^{0.65}}\right)}, \quad (6)$$

где  $e^{\log\left(\frac{1}{k_s^{0.65}}\right)}$  – приближение (итерация) площади фигуры полученной формы с выбранными коэффициентами заполнения полного сечения провода

материалом и гладкости провода к площади круга, полученной сложением площадей номинального сечения алюминиевой и стальной частей провода.

Тогда, учитывая выражения (4)–(6) и принятые условия, диаметр провода можно определить по выражению:

$$d_{\text{пр}} = 2k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}}, \quad (7)$$

Тогда выражение (3) с учетом (7) перепишем в виде:

$$P_{\text{гол}} = 4g_0\pi c \left( k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} + c \right) \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Определение ветровых нагрузок произведено при гололедном образовании на поверхности провода и его отсутствии.

При отсутствии гололеда ветровую нагрузку можно найти по выражению:

$$P_{\text{ветр. отс. гол}} = \alpha C_x \frac{v^2}{8} k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий неравномерность действия ветра по длине пролета;  $C_x$  – аэродинамический коэффициент (лобового столкновения).

При гололеде ветровая нагрузка составит:

$$P_{\text{ветр. гол}} = \alpha C_x \frac{v^2}{8} \left( k_F \sqrt{\frac{(F_{\text{ст}} + F_{\text{п}})m_{\text{пр}}}{\pi\chi_{\text{зап}}}} + c \right) \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Совместные действия вертикальных и горизонтальных нагрузок на провод определяются при [21, 22]:

- отсутствии гололеда

$$P_{\text{рез. отс. гол}} = \sqrt{P_{\text{пров}}^2 + P_{\text{ветр. отс. гол}}^2}; \quad (11)$$

- гололеде

$$P_{\text{рез. гол}} = \sqrt{P_{\text{рез. верт}}^2 + P_{\text{ветр. гол}}^2}. \quad (12)$$

Для упрощения расчетов по выражениям (1), (8)–(12) и построения кривых, действующих на провод нагрузок, в работе использованы удельные

или приведенные механические нагрузки, которые определяются по выражению:

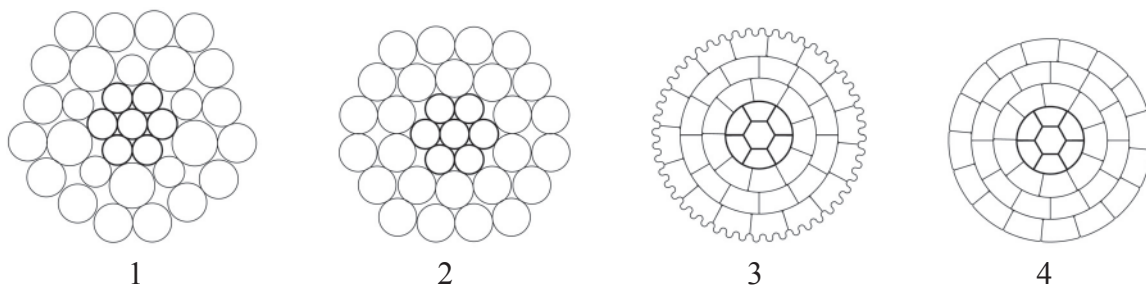
$$\gamma = \frac{P_i}{F}, \quad (13)$$

где  $P_i$  – принимаемая нагрузка;  $F$  – номинальное сечение проводящей и стальной частей провода.

**Таблица 1.** Исходные данные для расчета механических нагрузок, действующих на провода различных форм сечения

**Table 1.** Basic data for calculation of mechanical loadings on wires of various section forms

Параметр Characteristic	Обозначение Symbol	Принятая величина Accepted value
Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> /Nominal cross-section area, mm <sup>2</sup>		
проводящей части провода conducting part of a wire	$F_{\text{п}}$	118
стальной части провода steel part of a wire	$F_{\text{ст}}$	18,83
Аэродинамический коэффициент Aerodynamic coefficient		
при гололеде at glaze	$C_x$	1,1
при отсутствии гололеда without glaze		1,2
Коэффициент неравномерности скорости ветра по пролету Coefficient of wind speed unevenness on overhead span		
при гололеде at glaze	$\alpha$	1
при отсутствии гололеда without glaze		0,85
Коэффициент гладкости провода Coefficient of a wire smoothness		
1	$m_{\text{пр}}$ $m_{\text{wire}}$	0,8
2		0,82
3		0,61
4		1,0
Коэффициент заполнения полного сечения материалом Coefficient of filling a wire full section with material		
1	$\chi_{\text{зап}}$ $\chi_{\text{filling}}$	0,8
2		0,89
3		0,99
4		1,0

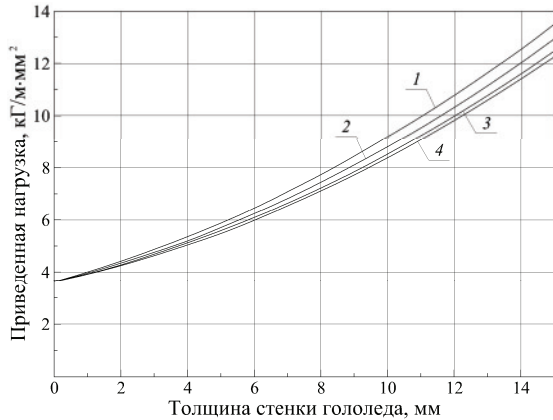


**Рис. 1.** Варианты форм поперечного сечения провода воздушной линии электропередачи сечением 120 мм<sup>2</sup>: 1 – провод типа АС  $\chi_{\text{зап}}=0,8$  и  $d_{\text{пр}}=16,89$  мм; 2 – провод типа АС  $\chi_{\text{зап}}=0,89$  и  $d_{\text{пр}}=15,14$  мм; 3 – провод с развитой боковой поверхностью (энергосберегающий)  $\chi_{\text{зап}}=0,99$  и  $d_{\text{пр}}=13,77$  мм [23]; 4 – гладкий провод, диаметр провода равен  $d_{\text{пр}}=13,12$  мм

**Fig. 1.** Options of forms of wire cross section in the overhead power transmission line with a section of 120 mm<sup>2</sup>: 1 is the wire of AC type  $\chi_{\text{filling}}=0,8$  and  $d_{\text{wire}}=16,89$  mm; 2 is the wire of AC type  $\chi_{\text{filling}}=0,89$  and  $d_{\text{wire}}=15,14$  mm; 3 is the wire with the developed side surface (energy efficient)  $\chi_{\text{filling}}=0,99$  and  $d_{\text{wire}}=13,77$  mm; 4 is the smooth wire with the diameter  $d_{\text{wire}}=13,12$  mm

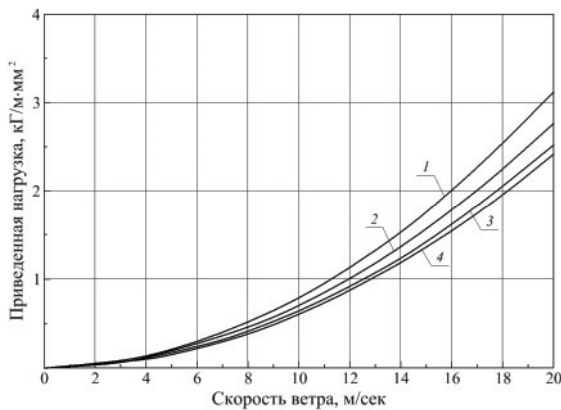


Результаты расчета приведенных механических нагрузок (13) выражений (8)–(10), (12) для исходных данных, представленных в табл. 1, при различной толщине стенки гололеда, скорости ветра, и форм провода (рис. 1) представлены на рис. 2–5.



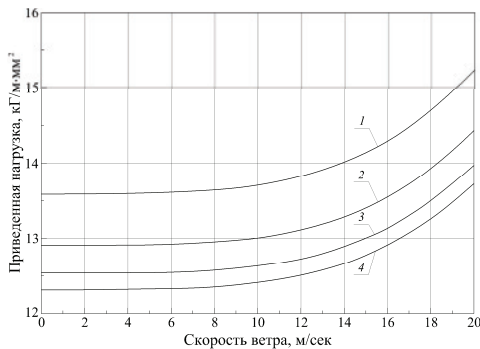
**Рис. 2.** Приведенная полная вертикальная нагрузка, действующая на провод при отсутствии ветра, при изменении толщины стенки гололеда (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 2.** Given vertical loading on a wire depending on ice wall thickness without wind (1–4 are according to Fig. 1)



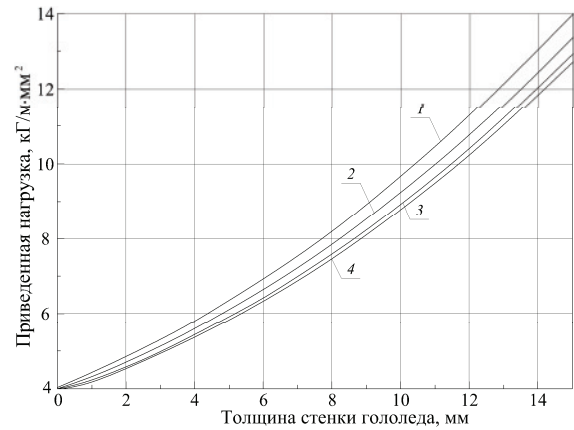
**Рис. 3.** Приведенная нагрузка, действующая на свободный от гололеда провод, при изменении скорости ветра (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 3.** Given loading on a wire, free from ice, at change of wind speed (1–4 are according to Fig. 1)



**Рис. 4.** Приведенная нагрузка, действующая на провод с гололедом ( $c=15$  мм), при изменении скорости ветра (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 4.** Given loading on a wire with the ice ( $c=15$  mm) at change of wind speed (1–4 are according to Fig. 1)



**Рис. 5.** Приведенная полная вертикальная нагрузка, действующая на провод, при ветре ( $v=20$  м/с), в зависимости от толщины стенки гололеда на поверхности провода (1–4 – по рис. 1)

**Fig. 5.** Given full vertical loadings on a wire at wind ( $v=20$  m/s) depending on ice wall thickness (1–4 are according to Fig. 1)

На рис. 1. представлены варианты форм поперечного сечения проводов.

Анализ рисунков показывает, что форма поперечного сечения провода влияет на величину гололедного образования на его поверхности и действие ветрового потока, следовательно, на вертикальную и горизонтальную нагрузки. Изменение коэффициентов гладкости провода и заполнения допустимую величину нагрузки, необходимо для выбора рационального сечения и формы провода.

#### Разработка алгоритма выбора неизолированного провода воздушной линии

На основе полученных зависимостей изменения механических нагрузок разработан алгоритм выбора неизолированного провода воздушной линии для питающей сети (рис. 6).

Алгоритм выбора провода в зависимости от вероятных механических нагрузок происходит в следующем порядке:

- задаются нормируемые значения нагрузок, действующих на провод, подбираются провода-аналоги;
- задаются исходные данные для расчета (погодные условия, аэродинамический коэффициент, коэффициент неравномерности ветрового потока, толщина стенки гололеда);
- определяется сечение провода по условиям, рекомендуемым при выборе неизолированного провода воздушной линии электропередачи (допустимый ток, падение напряжения), – данные условия требуют привязки к реальной схеме электроснабжения и могут опускаться при расчете механических нагрузок;
- задаются коэффициенты, определяющие форму поперечного сечения неизолированного провода воздушной линии электропередачи, – выполняется построение необходимой формы и вычисление диаметра провода;

- выполняются построения характеристик вероятных механических нагрузок, действующих на провода, при различных погодных условиях;
- выполняется сравнение механических нагрузок аналога и выбранного провода – при снижении действующих нагрузок на выбранную форму провода и выполнении ряда условий, представленных в работе [12], провод считается энергоэффективным и удовлетворяет условиям поиска.

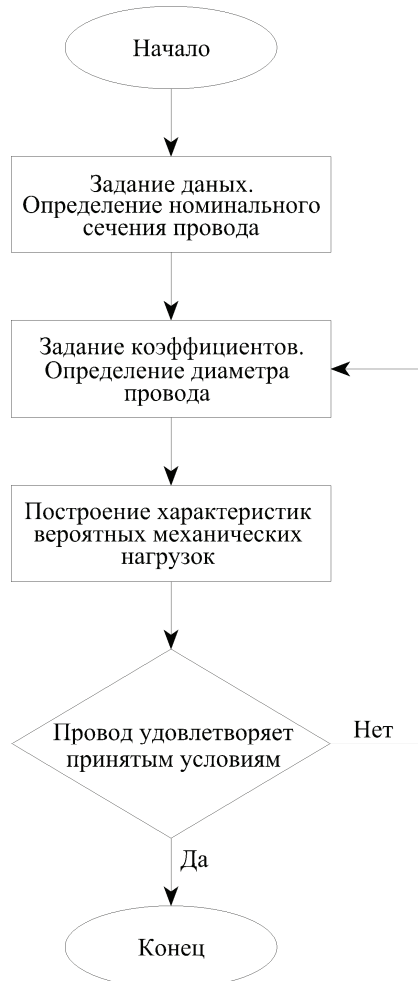


Рис. 6. Алгоритм выбора неизолированного провода воздушной линии

Fig. 6. Algorithm of selecting uninsulated wire of the overhead power transmission line

### Расчет критической длины пролета

Произведен расчет критической длины пролетов для оценки действия механических нагрузок на воздушную линию электропередачи.

Критическим длинам пролетов соответствуют расстояния, определяемые по нормальному тяжению провода, в которых напряжения достигают граничных значений, как при наибольшей нагрузке, так и при минимальной температуре окружающей среды [20].

Для определения критической длины пролетов необходимо рассчитать допустимые (фиктивные) напряжения в проводах [19].

- при длине пролета меньше или равной критической:

$$\sigma_M = \sigma_a \frac{E}{E_a} - (\alpha - \alpha_a)(t_M - t')E, \quad (14)$$

где  $\sigma_a$  – нормальное тяжение провода;  $E$  – модуль упругости провода в целом;  $E_a$  – модуль упругости алюминиевой части провода;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения провода;  $\alpha_a$  – температурный коэффициент линейного расширения алюминиевой части провода;  $t_M$  – расчетная максимальная температура окружающей среды;  $t'$  – температура при изготовлении провода.

- при длине пролета больше критической:

$$\sigma_H = \sigma_a \frac{E}{E_a} - (\alpha - \alpha_a)(t_H - t')E, \quad (15)$$

где  $t_H$  – расчетная температура окружающей среды при увеличении ледяного покрова на поверхности провода.

Критическая длина пролета для каждого из вариантов проводов (рис. 1), с учетом (14) и (15) определяется по выражению:

$$l_K = \frac{\sigma_H}{P_{\text{пров}}} \sqrt{\frac{24\alpha_a(t_H - t_M)}{q^2 - \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_M}\right)^2}}, \quad (16)$$

где  $q = \frac{P_{\text{ветр. гол}}}{P_{\text{пров}}}$  – критическая нагрузка.

Для расчета критической длины пролетов (16) были приняты следующие условия и допущения:

- тяжение провода нормальное  $\alpha_a = 8 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- модуль упругости провода в целом  $E = 8500 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- модуль упругости алюминиевой части провода  $E_a = 6300 \text{ кГ/мм}^2$ ;
- расчетная минимальная температура окружающей среды  $t_M = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура при изготовлении провода  $t' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температурный коэффициент линейного расширения провода в целом  $\alpha = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;
- температурный коэффициент линейного расширения алюминиевой части провода  $\alpha_a = 23 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;
- максимальная толщина стенки гололеда  $c = 15 \text{ мм}$ ;
- максимальная скорость ветра  $v = 20 \text{ м/с}$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет критической длины пролетов

Table 2. Calculation of critical spans

Вариант Version	Параметры формы провода Wire form parameters		Критический пролет линии, м Critical overhead span, m	Снижение критического пролета, % Reducing the critical span, %
	коэффициент гладкости smoothness coefficient	коэффициент заполнения filling coefficient		
4	1,0	1,0	94	–
3	0,61	0,99	92	2,1
2	0,82	0,89	89	5,3
1	0,8	0,8	85	9,6

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что критическая длина пролета зависит от коэффициентов, определяющих форму поперечного сечения провода, позволяет подобрать необходимый критический пролет. Так, при использовании провода типа АС критический пролет составляет 89 м, что на 5,3 % меньше, чем при использовании провода с абсолютно гладкой поверхностью, проволоки у которого вплотную сопряжены друг с другом. Следует отметить, что провода с развитой поверхностью [12, 23] позволяют увеличить длину критического пролета до 92 м. Величина критической длины пролета значительно снижается при уменьшении коэффициента заполнения и достигает 85 м для варианта конструктивного исполнения провода под номером 1 (рис. 1).

#### Заключение

Получены зависимости приведенной механической нагрузки от погодных условий для различных вариантов форм поперечного сечения провода. Установлено, что на величину приведенной меха-

нической нагрузки, действующей на провод, а также на критическую длину пролета оказывают влияние коэффициенты гладкости поверхности и заполнения полного сечения материалом. Так, полная вертикальная нагрузка, действующая на провод с наибольшим диаметром (вариант 1), на 10 % больше, чем та, что действует на провод с гладкой поверхностью, проволоки которого более плотно сопряжены друг с другом (вариант 4), а разница критической длины пролета составляет 9,6 %.

Хотя наименьшей приведенной нагрузке подвержен провод с гладкой поверхностью, проволоки которого более плотно сопряжены друг с другом, существуют варианты форм поперечного сечения, обладающие аналогичными коэффициентами заполнения полного сечения материалом, но при этом с развитой боковой поверхностью [11, 22]. Развита боковая поверхность позволяет пропускать больший ток, в сравнении с проводами с гладкой поверхностью, за счет меньшей температуры нагрева провода [11, 22].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворова И.А. Выбор сечений проводников и рациональных напряжений распределительных электрических сетей в современных условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2015. – 15 с.
2. Самарин А., Масалов В. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // *Control Engineering Россия*. – 2013. – № 3. – С. 88–94.
3. Shakirov R.G., Ismagilov F.R., Babikova N.L. Organization of the melting of ice by an alternating current on the wires of overhead electric power lines // *Power Technology and Engineering*. – 2012. – V. 46. – № 2. – P. 163–167.
4. Teegala S.K., Singal S.K. Optimal costing of overhead power transmission lines using genetic algorithms // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – V. 83. – P. 298–308.
5. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular Velocity's Neural Network Observer of the Electric Drive of TVR // *Type Implemented in Software Environment LabVIEW. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 132. – P. 1–6.
6. СТО 56947007–29.240.50.002–2008 Методические указания по количественной оценке механической надежности действующих воздушных линий напряжением 0,38...10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках: стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Введен 03.02.2005. – М., 2009. – 43 с.
7. Титов Д.Е. Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи // *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2014. – № 1. – С. 31–34.
8. Сводный отчет по аварийным отключениям // Официальный сайт АО «Тюменьэнерго». URL: [http://www.te.ru/clients/sistema\\_obslyuzhivaniya\\_potrebitelej/informaciya\\_ob\\_otklyucheniya/avarijnye/svodnyj\\_otchet/](http://www.te.ru/clients/sistema_obslyuzhivaniya_potrebitelej/informaciya_ob_otklyucheniya/avarijnye/svodnyj_otchet/) (дата обращения 15.05.2017).
9. Панасенко М.В. Оперативные и перспективные мероприятия по снижению гололедно-ветровых аварий в электросетях // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12. – С. 463–463.
10. Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G. Monitoring the intensity of ice formation on overhead electric power lines and contact networks // *Power Technology and Engineering*. – 2015. – V. 49. – № 1. – P. 78–82.
11. Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables / B. Wieceka, G. de Meyb, V. Chatziathanasiouc, A. Papagiannakisc, I. Theodosoglouc // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – V. 58. – P. 199–205.
12. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Петрова Т.Е. Условия успешной плавки гололеда на неизолированных проводах воздушных линий // *Электричество*. – 2013. – № 8. – С. 21–27.
13. Латыпов И.С., Хмара Г.А., Сушков В.В. Подход к обоснованию выбора энергоэффективной формы витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6–35 кВ // *Промышленная энергетика*. – 2017. – № 4. – С. 8–12.
14. Shaohua Wang, Xingliang Jiang. Progress in research on ice accretions on overhead transmission lines and its influence on mechanical and insulating performance // *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*. – 2012. – V. 7. – № 3. – P. 326–336.
15. Кириченко Н.В., Петрова Е.В. Анализ результатов моделирования температуры неизолированных проводов воздушных линий электроэнергетических систем с учетом влияния солнечной радиации // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 1. – С. 164–168.
16. Keyhana H., McClurea G., Habashib W. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction // *Computers & Structures*. – 2013. – V. 122. – P. 135–144.
17. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on heating uninsulated wires of overhead transmission lines // *Power Technology and Engineering*. – 2017. – V. 51. – № 1. – P. 119–125.
18. Limiting sensitivity of location probing of power transmission lines while detecting ice coatings / R.G. Minullin, E.Yu. Abdullazyanov, V.A. Kasimov, T.K. Filimonova, M.R. Yarullin // *Russian electrical engineering*. – 2016. – V. 87. – № 6. – P. 304–311.
19. Петров В.С., Дубровская Т.И. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий как основа расчета надежности конструкций // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. – 2015. – Т. 7. – № 6. – С. 1–13.
20. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.
21. Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций //

- Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. – 2012. – Т. 12. – № 4. – С. 147–154.
22. Panteli M., Mancarella P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies // Electric Power Systems Research. – 2015. – V. 127. – P. 259–270.
23. Провод для воздушных линий электропередачи: пат. 2631421 Рос. Федерация: заявл. 13.04.16; опубл. 22.09.17, Бюл. № 27. – 10 с.

*Поступила 28.11.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Латыпов И.С.**, аспирант кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета; инженер электротехнического отдела Управления по обустройству месторождений ООО «Томский нефтяной научный центр».

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

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 621.315.145:624.3.056

## ASSESSMENT OF MECHANICAL LOADS ON THE OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES OF 6–35 kV VOLTAGE CLASS

Irek S. Latypov<sup>1,4</sup>,  
Irek.tat.Latypov@gmail.com

Valery V. Sushkov<sup>2</sup>,  
Sushkovvv@gray-nv.ru

Vadim V. Timoshkin<sup>3</sup>,  
Timvv@sibmail.com

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
70, Melnikayte Street, Tyumen, 625027, Russia.

<sup>2</sup> Nizhnevartovsk State University,  
56, Lenin Street, Nizhnevartovsk, 628605, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>4</sup> Tyumen Petroleum Research Center,  
42, Maksim Gorky street, Tyumen, 625048, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to increase energy efficiency and reliability of operation of overhead power transmission lines using an uninsulated stranded wire in distribution network of 6–35 kV voltage class at external effects. Development of this direction will allow lowering emergencies in distributive network, in particular, in oil and gas branch where lengths of air-lines of 6–35 kV voltage class reach several tens of kilometers.

**The main aim** of the research is to justify the influence of a cross section form of a stranded uninsulated wire of overhead power transmission line of 6–35 kV voltage class, depending on the accepted coefficients of filling the wire full section with material and wire smoothness on values of possible mechanical loadings on wires taking into account weather conditions.

**Objects:** stranded uninsulated wire of overhead power transmission lines of 6–35 kV voltage class.

**Methods.** The method of limit states when determining permissible settlement load was used.

**Results.** The authors have obtained the formulas which allow determining the diameter of a wire depending on the accepted coefficients of filling the wire full section with material and wire smoothness. Based on the formulas obtained the authors showed the dependences of possible mechanical loadings on wires on weather conditions and the taken form of the wire cross section. On the basis of the introduced dependences the authors proposed the algorithm for determining possible mechanical loadings on a wire. This algorithm allows selecting the wire of overhead power transmission lines of 6–35 kV voltage class. The authors assessed the critical spans on the example of using a wire with a nominal section of 120 mm<sup>2</sup>.

### Key words:

Overhead power transmission line, uninsulated wire, ice loading, speed of wind, mechanical loading, critical span.

### REFERENCES

1. Suvorova I.A. *Vybor secheniy provodnikov i ratsionalnykh napryazheniy raspredelitelnykh elektricheskikh setey v sovremennykh usloviyakh*. Avtoreferat Dis.... kand. nauk [The choice of sections of conductors and rational tension of distributive electrical networks in modern conditions. Cand. Diss. Abstract]. Novocherkassk, 2015. 15 p.
2. Samarin A., Masalov V. Modern technologies of monitoring of air power supply networks of the power line. *Control Engineering Russia*, 2013, no. 8, pp. 88–94. In Rus.
3. Shakirov R.G., Ismagilov F.R., Babikova N.L. Organization of the melting of ice by an alternating current on the wires of overhead electric power line. *Power Technology and Engineering*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 163–167.
4. Teegala S.K., Singal S.K. Optimal costing of overhead power transmission lines using genetic algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 83, pp. 298–308.
5. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular Velocity's Neural Network Observer of the Electric Drive of TVR. *Type Implemented in Software Environment LabVIEW. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 132, pp. 1–6.
6. STO 56947007–29.240.50.002–2008 *Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennoy otsenke mekhanicheskoy nadezhnosti deystvuyushchikh vozdukhnykh liniy napryazheniyem 0,38...10 kV pri golodno-vetrovykh nagruzkakh* [Company Standard 56947007–29.240.50.002–2008 Methodical instructions by quantitative assessment of mechanical reliability of the operating air-lines of 0,38...10 kV at ice and wind loadings]. Moscow, 2009. 43 p.
7. Titov D.E. Physical processes of formation of ice deposits on wires of air-lines of an electricity transmission. *Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 31–34. In Rus.
8. Svodnyy otchet po avariynym otklyucheniyam [Summary report on emergency shutdowns]. *Tyumenenergo*. Available at: [http://www.te.ru/clients/sistema\\_obslyuzhivaniya\\_potrebitelej/informaciya\\_ob\\_otklyucheniyah/avariynye/svodnyj\\_otchet/](http://www.te.ru/clients/sistema_obslyuzhivaniya_potrebitelej/informaciya_ob_otklyucheniyah/avariynye/svodnyj_otchet/) (accessed 15 May 2017).
9. Panasenko M.V. Operational and perspective actions for lowering of ice and wind accidents in power supply networks. *Mezhduna-*

- rodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2016, no. 12, pp. 463–463. In Rus.
10. Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G. Monitoring the intensity of ice formation on overhead electric power lines and contact networks. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 78–82.
  11. Wieceka B., De Meyb G., Chatziathanasiouc V., Papagiannakisc A., Theodosoglouc I. Harmonic analysis of dynamic thermal problems in high voltage overhead transmission lines and buried cables. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, vol. 58, pp. 199–205.
  12. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Petrova T.E. Conditions of successful melting of ice on uninsulated wires of air-lines. *Electricity*, 2013, no. 8, pp. 21–27. In Rus.
  13. Latypov I.S., Chmara G.A., Sushkov V.V. Approach to justification of the choice of energy efficient form of a twisted uninsulated wire of an air-line of electricity transmission of 6–35 kV voltage class. *Promyshlennaya energetika*, 2017, no. 4, pp. 8–12. In Rus.
  14. Shaohua Wang, Xingliang Jiang. Progress in research on ice accretions on overhead transmission lines and its influence on mechanical and insulating performance. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 326–336.
  15. Kirichenko N.V., Petrova E.V. The analysis of results of modeling the temperature of uninsulated wires of air-lines of electrical power systems taking into account influence of solar radiation. *Omskiy nauchny vestnik*, 2013, no. 1, pp. 164–168. In Rus.
  16. Keyhana H., McClurea G., Habashib W. Dynamic analysis of an overhead transmission line subject to gusty wind loading predicted by wind-conductor interaction. *Computers & Structures*, 2013, vol. 122, pp. 135–144.
  17. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on heating uninsulated wires of overhead transmission lines. *Power Technology and Engineering*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 119–125.
  18. Minullin R.G., Abdullazyanov E.Yu., Kasimov V.A., Filimonova T.K., Yarullin M.R. Limiting sensitivity of location probing of power transmission lines while detecting ice coatings. *Russian electrical engineering*, 2016, vol. 87, no. 6, pp. 304–311.
  19. Petrov V.S., Dubrovskaya V.S. Mechanical calculation of wires and cables of air-lines as basis of calculation of reliability of designs. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 1–13. In Rus.
  20. Keselman L.M. *Osnovy mekhaniki vozdukhnykh liniy elektropere-dachi* [Fundamentals of mechanics of electricity transmission air-lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 352 p.
  21. Goldstein R.W., Epifanov V.P. Adhesive durability of ice deposits on elements of metal designs. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Mathematics, mechanics, informatics*, 2012, vol. 12, no. 4, pp. 147–154. In Rus.
  22. Panteli M., Mancarella P. Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol. 127, pp. 259–270.
  23. Latypov I.S., Bogachkov I.M. *Provod dlya vozdukhnykh liniy elektropere-dachi* [Wire for overhead power lines]. Patent RF, no. 2631421, 2017.

Received: 28 November 2017.

#### Information about the authors

**Irek S. Latypov**, postgraduate, Tyumen Industrial University; engineer, Tumen Petroleum Center.

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

**Vadim V. Timoshkin**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК561:571.762(571.1)

## ПАЛЕБОТАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЮМЕНСКОЙ И НАУНАКСКОЙ СВИТ (СРЕДНЯЯ-ВЕРХНЯЯ ЮРА ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Рычкова Ирина Владимировна<sup>1</sup>,  
irina.rychkova@mail.ru

Шамина Марина Ивановна<sup>1</sup>,  
mshaminova@mail.ru

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

**Актуальность.** Традиционное использование данных геофизических исследований скважин при стратиграфическом расчленении и корреляции стратоноров юго-востока Западной Сибири не всегда позволяет уверенно провести границы между литологически схожими отложениями. В связи с этим возникают сложности при построении геологической модели месторождений, что в конечном итоге может привести к неэффективному освоению и удорожанию разработки залежей углеводородного сырья.

**Цель** исследования заключается в выделении комплексов растений, которые являются характерными для тюменской и наунакской свит, для проведения биостратиграфического расчленения и корреляции нефтепродуктивных отложений на площадях (месторождениях) Снежная и Двойная в Томской области на юго-востоке Западной Сибири.

**Объекты:** палеоботанические остатки из керн скважин площадей Снежная и Двойная, а также опубликованный материал предыдущих исследований.

**Методы.** Для определения отпечатков растений применялись сравнительно-морфологический и эпидермально-кутикулярный методы. Отпечатки ископаемых растений изучались под бинокулярным микроскопом МБС-1 и ЛОМО. Для стратиграфического расчленения и корреляции отложений применялся метод комплексного анализа органических остатков.

**Результаты.** Изучен палеоботанический материал из средне-верхнеюрских отложений юго-востока Западной Сибири (площади Снежная и Двойная). Установлена приуроченность растительных таксонов к определенным свитам (тюменской и наунакской). Выяснено, что для тюменской свиты характерными являются папоротники *Raphaelia diamensis* и *Coniopteris vialovae*, а также голосеменные чекановские *Phoenicopsis mogutchevae*, *Czekanowskia rigida* и *Cz. irkutensis*. Для наунакской свиты характерными являются эндемичные папоротники *Coniopteris latilobus* и голосеменные чекановские *Czekanowskia tomskiensis*, а также широко распространенные хвойные *Podozamites eichwaldii*. Эндемичный состав флоры наунакского комплекса растений вполне обоснованно указывает на специфические условия формирования наунакской свиты. Проведено расчленение однотипных по литологическому составу стратоноров. Создана надежная база для стратиграфического расчленения и корреляции средне-верхнеюрских отложений, которая станет основой для построения достоверной геологической модели месторождений, что приведет к более эффективному проведению геологоразведочных работ на юго-востоке Западной Сибири.

### Ключевые слова:

Юго-восток Западной Сибири, средняя-верхняя юра, наунакская свита, тюменская свита, палеоботанические остатки.

### Введение

В связи с нефтегазоносной продуктивностью средне-верхнеюрских отложений юго-востока Западной Сибири вопросы стратиграфического расчленения до сих пор являются актуальными [1]. При изучении толщ используются данные геофизических исследований скважин (ГИС), которые не всегда однозначно позволяют выделять свиты с похожей литологофациальной характеристикой, т. к. не несут в себе генетического и стратиграфического объяснения [2]. Не вызывает сомнения, что необходимо применять комплексный подход к изучению нефтепродуктивных отложений, с применением геофизических, биостратиграфических, литологогеохимических методов и анализа особенностей происхождения реперных пластов углей. Без этого невозможно адекватно проводить индексацию пластов и строить правильную модель месторождения.

В данной работе приводится результат биостратиграфического расчленения – одного из основных этапов в комплексе необходимых методов.

Продуктивные отложения юго-востока Западной Сибири представлены васюганским горизон-

том, куда входит васюганская и наунакская свиты (верхний бат-келловей-оксфорд) и подстилающей его тюменской свитой (верхний аален-байос-низы верхнего бата). Разделение этих свит между собой до сих пор является дискуссионным [3]. Трудность выделения стратиграфических подразделений обусловлена линзовидной формой геологических тел, малой контрастностью литологических разностей, слагающих свиты.

В этом случае возрастает значимость прямых методов, при строгом биостратиграфическом контроле [4]. При отсутствии ортостратиграфической фауны в этих свитах решающую роль при стратиграфическом расчленении должны играть растительные макроостатки, которые довольно обильно представлены в керне скважин юго-востока Западной Сибири, там, где в большей мере распространены юрские переходные и континентальные фации.

Фитостратиграфические исследования средне-верхнеюрских отложений Западной Сибири, которые проводятся уже несколько десятков лет, связаны с именами Ю.В. Тесленко, В.А. Самылиной, А.И. Киричковой, Н.К. Могучевой, Е.И. Костиной, Л.И. Быстрицкой, Т.А. Травиной и др. По-

следней значимой работой, обобщающей весь накопленный в этой области материал с применением результатов эпидермально-кутикулярных исследований, является монография А.И. Киричковой, Е.И. Костиной, Л.И. Быстрицкой, 2005 г. В этой фундаментальной работе выделено поэтапное развитие западносибирской палеофлоры, что позволило расчленить юрские континентальные отложения Западной Сибири на фитогоризонты: уренгойский (нижняя юра), томский (аален-байоснижний бат) и наунакский (верхний бат-келловей-нижний оксфорд). Томский фитогоризонт разделен на три комплекса растений: верхнепешковский (соответствует салатской свите), ажарминский и малышевский (соответствуют тюменской свите). Наунакский фитогоризонт включает в себя одноименный комплекс растений и соответствует наунакской свите. Возраст определен по фауне двустворок, фораминифер и палинокомплексам [5].

В составе этих комплексов растений большое стратиграфическое значение имеют папоротники *Coniopteris*, а также голосеменные растения *Czekanowskia* и *Phoenicopsis* [6, 7].

В работе была проведена ревизия имеющегося в распоряжении авторов палеоботанического материала по Западной Сибири (коллекция Л.И. Быстрицкой, находится в Томском государственном университете). Также был использован материал опубликованных работ (рассмотрено более чем 50 скважин). Основным палеоботаническим материалом для статьи послужили макроостатки из керна скважин на площадях Снежная (№ 170, 446, 430, 135, 301) и Двойная (№ 1, 2, 5) (коллекция Рычковой И.В. под № 72 хранится в Томском политехническом университете).

Изучение отпечатков папоротников, хвощовых, хвойных и др. проводилось сравнительно-морфологическим методом, а образцы чекановских изучались с помощью эпидермально-кутикулярного анализа. Возможности этого анализа большие, так как он позволяет определять морфологически схожие растения до видов. А поскольку некоторые виды чекановских охватывают интервал времени всего от одного до двух геологических веков, то огромное стратиграфическое значение этих растений не вызывает сомнения.

Площади Снежная и Двойная находятся в Томской области, на юго-востоке Западной Сибири (рис. 1).

В схеме структурно-фациального районирования нижней и средней (без келловей) юры Западной Сибири они расположены в Тымском фациальном районе Обь-Тазовской фациальной области. А в схеме келловей и верхней юры находятся в Сильгинском районе Омско-Чулымской фациальной области. Формирование отложений в этих фациальных районах происходило в условиях переходного седиментогенеза, что наложило свой отпечаток на литолого-фациальную и палеоботаническую характеристики тюменской и наунакской свит. Разработка и изучение Снежного и Двойного месторождений, способствующие накоплению новой геологической информации, показали, что для эффективного освоения нефтепродуктивных отложений прежняя стратиграфическая разбивка не позволяет построить достоверную геологическую модель месторождения.

#### Результаты исследований

С помощью одного из биостратиграфических методов (метода комплексного анализа органиче-



Рис. 1. Местонахождение изучаемых площадей (месторождений)

Fig. 1. Location of the study areas





ских остатков), который заключается в выяснении распределения всех окаменелостей в разрезе, удалось выделить руководящие ассоциации макрорастений и использовать их для стратиграфического расчленения отложений в разрезах скважин на площадях Снежная и Двойная (рис. 2). Тонкими линиями на этом рисунке отмечается интервал времени, в который они произрастали в Западной Сибири. Стратиграфически важные таксоны, которые вошли в слои с флорой (Решения..., 2004 г.; А.И. Киричкова и др., 2005 г.), выделены желтой или пунктирной линиями соответственно. Распространение видов нами оценивалось с учетом всего имеющегося материала по Западной Сибири.

Из таблицы видно, что некоторые виды являются транзитными, встречаются как в тюменской, так и в наунакской свите. Но есть растения, которые встречаются только в тюменской свите (*Czekanowskia irkutensis*, *Cz. rigida*, *Phoenicopsis mogutchevae*, *Raphaelia diamensis*) или в наунакской (*Czekanowskia tomskensis*). Ниже приводится палеоботаническая характеристика тюменской и наунакской свит.

Палеоботаническая характеристика тюменской свиты

На изучаемой территории тюменская свита представлена чередующимися прослоями сероцветных песчаников, алевролитов и аргиллитов с прослоями углей и конгломератов. В свите встречается обильный растительный детрит, обломки стеблей, отпечатки папоротников и других частей растений.

В тюменской свите присутствует богатый состав флористических остатков: папоротники, цикадовые, чекановские, хвощи, хвойные и др. [8].

Общий список ископаемых растений тюменской свиты на площадях Снежная и Двойная таков: *Equisetites lateralis*, *Equisetostachys* sp., *Coniopteris vialovae*, *C. depensis*, *C. burejensis*, *C. vsevolodii*, *C. simplex*, *Raphaelia diamensis*, *R. stricta*, *Nilssonia urmanica*, *Ginkgo* sp., *Czekanowskia irkutensis*, *Cz. rigida*, *Cz. ex gr. rigida*, *Phoenicopsis mogutchevae*, *Ph. varia*, *Podozamites* cf. *lanceolatus*, *Hepaticites* cf. *wonnacotti*. Преобладающими в количественном отношении и видовом разнообразии являются папоротники (7 видов), им немного уступают чекановские (5 видов) и подчиненное положение занимают хвощи, хвойные, гинкговые и мхи (рис. 3).

Характерными видами в тюменской свите являются папоротники *Raphaelia diamensis* и *Coniopteris vialovae*, а также чекановские *Phoenicopsis mogutchevae*, *Czekanowskia rigida* и *Cz. irkutensis*.

Папоротник *Raphaelia diamensis* Seward впервые был выделен А. Сьюордом в 1907 г. из среднеюрских отложений Джунгарского Алатау. Этот папоротник имел широкое распространение во флорах Сибири и смежных с ней районах: северо-запад Китая [9–10], Монголия [11–13], Иркутский угленосный бассейн [14], Тува, Чулымо-Енисейский бассейн, Кузнецкий бассейн [15], Вилуйская впадина, Предверхооянский прогиб, бассейн рр. Зеи и Буреи. В ааленских-байосских отложениях Западной Сибири *Raphaelia diamensis* встречается на площадях Варь-Еганская, Южно-Колтогорская и Южно-Поселковая. В батских отложениях ареал папоротника *Raphaelia diamensis* расширяется (он встречается в скважинах площадей Холмистая, Квартовая, Александровская, Снежная). Трансгрессирующий морской бассейн к кон-

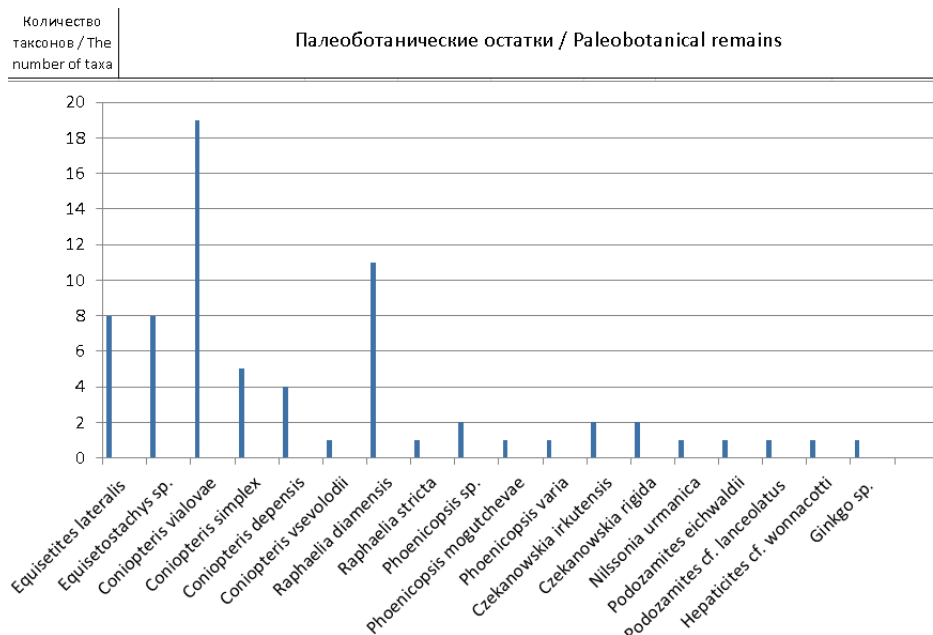


Рис. 3. Состав растений тюменской свиты в изученных скважинах

Fig. 3. Composition of the plants of the Tyumen formation in the studied wells

цу среднеюрской эпохи оказал смягчающее влияние на климат прибрежной области, позволив влаголюбивым папоротникам расселиться южнее на Западно-Сибирском морском палеопобережье [16].

Папоротник *Coniopteris vialovae* Turutanova-Ketova впервые выделен А.И. Турутановой в 1958 г. в среднеюрских отложениях Мангышлака. Вид был широко распространен в юре (особенно средней) Западной Туркмении и Западной Сибири. В скважинах Западной Сибири этот вид преимущественно встречается в тюменской свите, но единичные находки предыдущими исследователями отмечаются и в наунакской.

*Czekanowskia rigida* Heeg был выделен О. Геером в 1876 г. в нижней-средней юре. Он имеет широкое распространение (Западная Сибирь, Кузнецкий бассейн, Восточная Сибирь). Это одно из самых часто встречающихся растений в Иркутском угленосном бассейне.

*Phoenicopsis mogutchevae* Kiritchkova et Travinina был выделен А.И. Киричковой и Т.А. Травиной в 2002 г. на западносибирском материале (Асомкинская площадь, скв. Р-17). Встречается только в батских отложениях тюменской свиты.

*Czekanowskia irkutensis* Kiritchkova et Samylnina был выделен А.И. Киричковой и В.А. Самылиной в 1991 г. в Восточной Сибири (Иркутский угленосный бассейн, Каранцайский р-н, скв. ПК-487 в черемховской свите нижней юры). Данный вид встречается также и в Западной Сибири в нижней юре, и в низах средней юры (тюменской свите).

Таким образом, во время формирования тюменской свиты западносибирская палеофлора была довольно разнообразной и имела общие черты с растительными сообществами смежных регионов.

#### Палеоботаническая характеристика наунакской свиты

Наунакская свита похожа на нижезалегающую тюменскую свиту, является возрастным аналогом морской васюганской свиты, распространенной западнее изучаемой территории. Представлена наунакская свита серыми алевролитами, аргиллитами, реже песчаниками. Присутствуют включения обугленных растительных остатков, отпечатки листовых пластинок папоротников, другие фрагменты макрофлоры, но в меньшей степени, чем в тюменской свите. В наунакской свите встречаются стяжения и вкрапленности пирита.

Наунакская свита с одноименным комплексом растений включает в себя менее представительный состав палеофлоры, чем нижезалегающий в тюменской свите. Это, вероятно, связано с климатическими изменениями в конце средней юры, повлиявшими на таксономическое разнообразие. В составе наунакской свиты чекановские создают монодоминантные скопления, слагающие прослой в терригенных отложениях [17, 18]. По сравнению с тюменской свитой в наунакской свите резко падает видовое разнообразие папоротников (3 вида). Тем не менее встречаются разнообразные хвощовые растения, размер которых иногда превышает диаметр зерна.

Общий список ископаемых растений, установленный в наунакской свите в керне скважин на площадях Снежная и Двойная: *Equisetites* sp., *Neocalamites* sp., *Coniopteris simplex*, *C. cf. burejensis*, *C. latilobus*, *Podozamites eichwaldii*, *P. lanceolatus*, *Czekanowskia tomskiensis*, *Carpolites cinctus* (рис. 4).

Несмотря на скудность наунакского флористического комплекса, в нем можно выделить характерные палеоботанические остатки: эндемичные

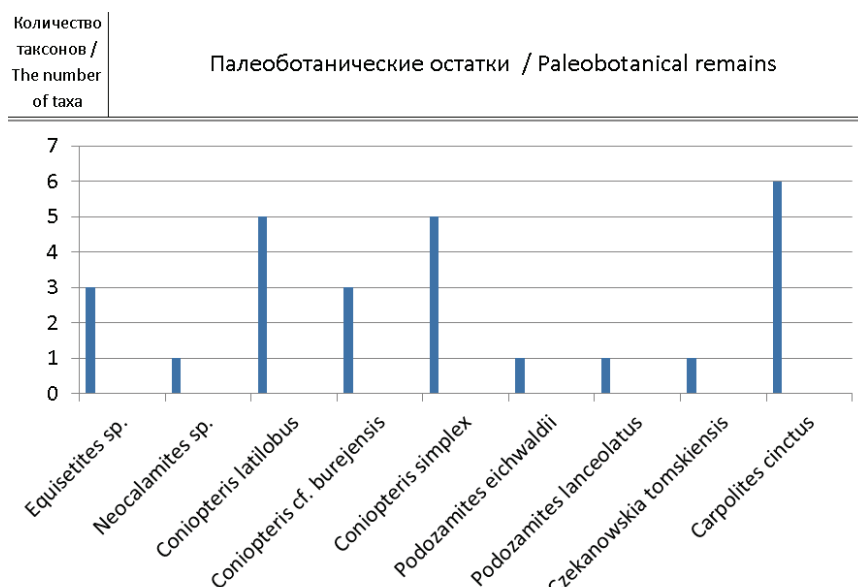


Рис. 4. Состав растений наунакской свиты в изученных скважинах

Fig. 4. Composition of plants of Naunak formation in the studied wells

папоротники и голосеменные (*Coniopteris latilobus* и *Czekanowskia tomskiensis*), а также широко распространенные хвойные *Podozamites eichwaldii*.

*Coniopteris latilobus* Bistritskaja был впервые описан Л.И. Быстрицкой в 1992 г. из отложений васюганского горизонта Западной Сибири (Игольская площадь, скв. 6, Томская область) [19]. Локальное распространение этого папоротника на юго-востоке Западной Сибири обусловлено его эндемичностью. Но частая встречаемость в керне скважин (более чем в 40 скважинах) служит показателем его расцвета в конце средней начале позднеюрской эпох. В наунакской свите отпечатки этого растения встречаются в самых верхних горизонтах тюменской свиты (почти на границе с наунаком, проведенной по данным ГИС – примерно 5–17 м ниже кровли тюменской свиты).

*Czekanowskia tomskiensis* Kiritchkova et Samulina впервые был выделен А.И. Киричковой и В.А. Самылиной из отложений васюганского горизонта Западной Сибири (Западно-Останинская площадь, скв. 446, Томская область). Позднее был описан в отложениях Герасимовской площади, скв. 8.

*Podozamites eichwaldii* Schimper впервые описан В.Ф. Шимпером в 1876 г. из верхнеюрских отложений Илецкой Защиты в Западном Казахстане. Вид широко распространен и известен из верхнеюрских и нижнемеловых отложений Забайкалья, Западной и Восточной Сибири, Кузнецкого бассейна, Буреинского бассейна, о. Шпицберген, Китая, Японии.

В некоторых скважинах хвойные растения *Podozamites eichwaldii* встречены вместе с папоротниками *Coniopteris latilobus* (Майская; скв. 400; В. Заячья, скв. 80; Весенняя, скв. 2), что повышает вероятность стратиграфической приуроченности *Coniopteris latilobus* к наунаку. В скв. 2 на пл. Двойная *Podozamites eichwaldii* обнаружен в переходных слоях от тюменской свиты к наунакской.

К транзитным средне-верхнеюрским растениям, которые встречаются в разрезах скважин в тюменской и наунакской свитах, можно отнести: *Coniopteris simplex*, *Coniopteris depensis*, *Coniopteris burejensis*, *Nilssonia urmanica*, *Podozamites lanceolatus*, *Equisetostachus* sp., *Elatides ovalis* и др. [20].

Наши наблюдения показали, что в районе исследований комплекс растений, принадлежащий наунакской свите, резко отличается от комплекса растений в тюменской свите. Изменения выражены в падении таксономического разнообразия и в обновлении систематического состава, что особенно заметно среди чекановскиеких и папоротников.

Среди руководящих ископаемых обеих свит отмечаются формы «угасающие», т. е. те, которые появляются единичными экземплярами в вышележащих отложениях. Например, отпечатки мелкоперышкового папоротника *Coniopteris vialovae* редко (5 образцов) встречаются в наунакской сви-

те (таблица). Папоротники *Coniopteris latilobus* и хвойные *Podozamites eichwaldii* изредка начинают появляться в верхних отложениях тюменской свиты, т. е. незадолго до своего массового появления в наунакской свите.

**Таблица.** Характерные растения тюменской и наунакской свит в Западной Сибири

**Table.** Typical plants of the Tyumen and Naunak formations in Western Siberia

Характерные ископаемые растения Characteristic fossil	Тюменская свита Tyumen formation		Наунакская свита Naunak formation	
	Ранее найдены в Западной Сибири Previously found in Western Siberia	Найдены на пл. Снежная и Двойная Found in Snezhnaya and Dvoynaya areas	Ранее найдены в Западной Сибири Previously found in Western Siberia	Найдены на пл. Снежная и Двойная Found in Snezhnaya and Dvoynaya areas
<i>Coniopteris latilobus</i>	5*	n/o n/d	37	5
<i>Podozamites eichwaldii</i>	n/o n/d	1	6	1
<i>Czekanowskia tomskiensis</i>	n/o n/d	n/o n/d	5	1
<i>Raphaelia diamensis</i>	20	11	n/o n/d	n/o n/d
<i>Coniopteris vialovae</i>	24	19	5	
<i>Czekanowskia rigida</i>	3	2	n/o n/d	
<i>Czekanowskia irkutensis</i>	2	2		
<i>Phoenicopsis mogutchevae</i>	6	1		

\*цифрами указано количество таксонов; n/o – не обнаружены.

\*the figures indicate the number of taxa; n/d – not detected.

На юго-востоке Западной Сибири в средней юре (формирование тюменской свиты) климат был семиаридным [21, 22]. Ископаемая флора является типичной для Сибирской палеофлористической области.

В позднем бате-келловее (формирование наунакской свиты) в Западной Сибири произошла гумидизация климата, которая была обусловлена влиянием трансгрессирующего морского бассейна. По данным палеоботанического и фациального анализов в наунакское время на юго-востоке Западной Сибири установилась озерно-аллювиальная равнина с пресноводными водоемами типа стариц, озер, с сильно увлажненными и заболоченными почвами [23]. Климатические перестройки повлияли на появление новых таксонов и формирование эндемичного состава наунакского комплекса растений [24].

Биостратиграфическое расчленение

Установив палеоботанические критерии для выделения тюменской и наунакской свит, нами



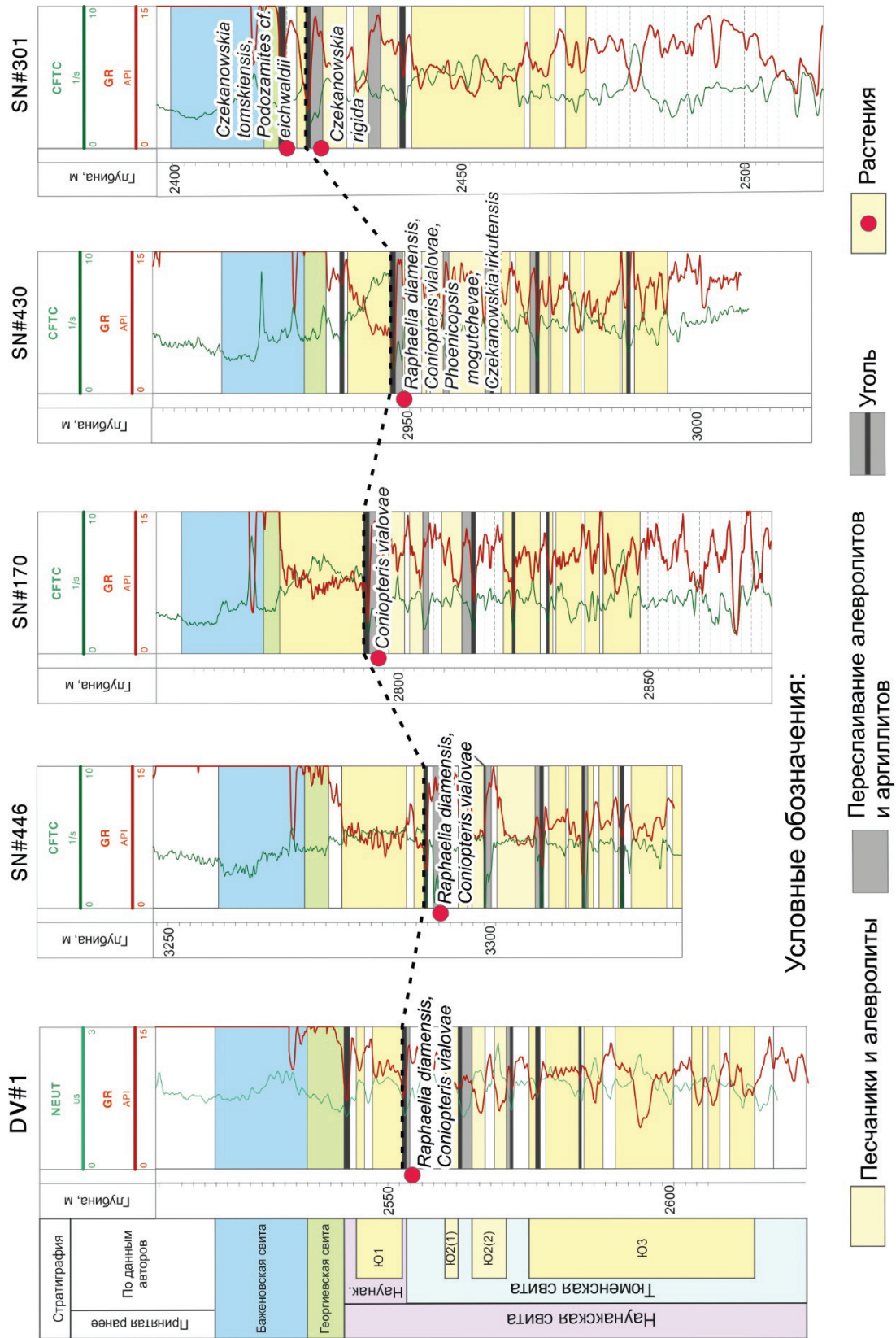


Рис. 5. Схема корреляции тюменской и наунакской свит по некоторым скважинам пл. Снежная и Двойная  
 Fig. 5. Scheme of correlation of Tyumen and Naunak formations in some wells of the areas Snezhnaya and Dvoynaya

Растения наунакской свиты  
Plants of Naunak formation



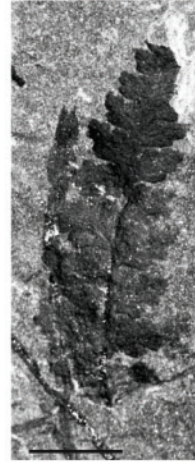
*Czekanowskia tomskiensis*  
(пл. Снежная, 301; гл. 2421.9)



*Podozamites eichwaldii*  
(пл. Снежная, 301; гл. 2421.9)



*Coniopteris cf. burejensis*  
(пл. Двойная, 5; гл. 2837.35)



Растения тюменской свиты  
Plants of Tyumen formation



*Coniopteris vialovae*  
(пл. Двойная, 1; гл. 2552.7)



*Coniopteris vialovae*  
(пл. Снежная, 430; гл. 2948.6)



*Raphaelia diamensis*  
(пл. Снежная, 446; гл. 3289.6)



*Raphaelia diamensis*  
(пл. Снежная, 430; гл. 2948.55)



*Raphaelia diamensis*  
(пл. Снежная, 430; гл. 2948.25)



*Coniopteris vialovae*  
(пл. Снежная, 430; гл. 2948.6)

Рис. 6. Некоторые растения тюменской и наунакской свит

Fig. 6. Some plants in Tyumen and Naunak formations



было проведено биостратиграфическое расчленение и корреляция разрезов скважин на площадях Снежная и Двойная (рис. 5).

Например, в скв. 301 пл. Снежная в углистых аргиллитах обнаружены чекановские *Czekanowskia rigida*. Наряду с хвощовыми и папоротниками они послужили основой для формирования пласта угля в тюменской свите.

Для наунакской свиты в этой скважине характерными являются *Czekanowskia tomskiensis* и *Podzamites cf. eichwaldii*. В сообществе с ними встречаются обрывки мелких и крупных хвощей и хвойных, которые также могли участвовать в образовании вышележащих углистых прослоев. Породы, слагающие наунакскую свиту в разрезе этой скважины, представлены мелкозернистыми песчаниками, алевролитами буровато-серыми с субгоризонтальной, линзовидной, волнистой слоистостью, нарушенной взмучиванием. Отмечается некоторое уменьшение размерности обломочного материала вверх по разрезу. Литолого-фациальная характеристика отложений и тафономические особенности палеоботанического материала свидетельствуют о континентальном осадконакоплении при активной гидродинамической деятельности среды.

Границу между тюменской и наунакской свитами в этой скважине проводим между двумя характерными комплексами растений по кровле углистой толщи, венчающей тюменскую свиту.

Полученные нами результаты по стратиграфическому расчленению и корреляции на площадях Снежная и Двойная расходятся с ранее принятой стратиграфической разбивкой, которая основывалась лишь на данных ГИС. Так, по нашим данным, наунакская свита сильно сократила свою толщину, вплоть до десятка метров, с возможностью выклинивания на соседних участках восточнее изученного района.

Фотографии некоторых растений, приуроченных к тюменской или наунакской свитам, приводятся на рис. 6.

#### Заключение

В результате изучения отпечатков макроостатков растений из керна скважин площадей Снежная и Двойная на юго-востоке Западной Сибири (Томская область), а также по итогам ревизии и анализа опубликованного материала были выделе-

ны комплексы растений, характерные для тюменской и наунакской свит.

Установлено, что характерными растениями для тюменской свиты можно считать папоротники *Raphaelia diamensis* и *Coniopteris vialovae*, а также чекановские *Phoenicopsis mogutchevae*, *Czekanowskia rigida* и *Cz. irkutensis*.

Папоротники *Coniopteris latilobus*, хвойные *Podzamites eichwaldii* и чекановские *Czekanowskia tomskiensis* могут рассматриваться в качестве характерных таксонов для наунакской свиты. Эндемичный состав флоры наунакского комплекса растений вполне обоснованно указывает на специфические условия формирования наунакской свиты, что обусловлено климатическими перестройками в конце среднеюрской эпохи.

Анализ палеоботанических данных показал, что фитостратиграфический рубеж средней и верхней юры на юго-востоке Западной Сибири обозначен обновлением видового состава растений и появлением новых, порой эндемичных форм, связанный с изменениями физико-географических условий и прежде всего гумидизацией климата.

Метод комплексного анализа по остаткам макрорастений позволил уверенно провести расчленение однотипных по литологическому составу стратон (тюменской и наунакской свит) на пл. Снежная и Двойная. Кровлей тюменской свиты в изученных скважинах можно считать углистые и углисто-глинистые пласты, в подошве которых обнаружены характерные сообщества растений тюменской свиты.

В новой интерпретации стратиграфического расчленения на площадях Снежная и Двойная наунакская свита сократила толщину вплоть до десятка метров с возможным выклиниванием на соседних участках.

Новое стратиграфическое расчленение и корреляция средне-верхнеюрских отложений найдут свое отражение при построении усовершенствованной геологической модели месторождений Снежное и Двойное и приведут к более эффективному проведению геологоразведочных работ по освоению залежей углеводородного сырья на юго-востоке Западной Сибири.

*Авторы благодарят канд. геол.-минерал. наук Быстрицкую Людмилу Ильиничну за предоставленный палеоботанический материал по Западной Сибири.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейзель А.Л., Алифиров А.С. О возможности выделения аналогов васюганского, георгиевского и частично баженовского горизонтов Западной Сибири в стратотипических разрезах келловейского, оксфордского и кимериджского ярусов Южной Англии // Фациальный анализ в нефтегазовой литологии: труды II Регионального совещания, посвященного 100-летию со дня рождения д.г.-м. н. Л.Н. Ботвинкиной. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2012. – С. 199–205.
2. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система / Б.Н. Шурыгин, Б.Л. Никитенко, В.П. Девятков и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. – 480 с.
3. Решения 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири. – Новосибирск, 2003. – 114 с.
4. Стратиграфия в нефтяной геологии: методология исследований и актуальные проблемы / А.И. Киричкова, В.А. Чижова, Э.К. Сташкова, Н.К. Фортунатова, Б.Н. Шурыгин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – Т. 2. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/2/007.pdf> (дата обращения 01.02.2018).
5. Киричкова А.И., Костина Е.И., Быстрицкая Л.И. Фитостратиграфия и флора юрских отложений Западной Сибири. – СПб.: Недра, 2005. – 378 с.

6. Киричкова А.И., Быстрицкая Л.И., Травина Т.А. Род *Coniopteris* и чекановские в юрской флоре Западной Сибири и их значение для стратиграфии // Эволюция жизни на Земле: Материалы симпозиума. – Томск, 2001. – С. 353–354.
7. Киричкова А.И., Быстрицкая Л.И., Травина Т.А. Значение *Coniopteris* и *Czekanowskiales* для стратиграфии континентальной юры Западной Сибири // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2002. – Т. 10. – № 3. – С. 35–52.
8. Рычкова И.В. Палеоботаническая характеристика тюменской свиты средней юры (Томская область). Палеоботанический временник // Непериодическое приложение к журналу «*Lethaea rossica*. Российский палеоботанический журнал». – 2013. – Вып. 1. – С. 132–136.
9. The Upper Triassic to Middle Jurassic strata and floras of the Janggar Basin, Xinjiang, Northwest China / G. Sun, Y. Miao, V. Mosbrugger, A.R. Ashraf // *Palaeobio Palaeoenv*. – 2010. – V. 90. – P. 203–214. DOI: 10.1007/s12549-010-0039-8. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12549-010-0039-8.pdf> (дата обращения 01.02.2018).
10. A high resolution three-dimensional reconstruction of a fossil forest (Upper Jurassic Shishugou Formation, Junggar Basin, Northwest China) / J.K. Hinz, I. Smith, H-U. Pfretzschner, O. Wings, G. Sun // *Palaeobio Palaeoenv*. – 2010. – V. 90. – P. 215–240. DOI: 10.1007/s12549-010-0036-y. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12549-010-0036-y.pdf> (дата обращения 01.02.2018).
11. Kostina E.I., Herman A.B. The Middle Jurassic flora of South Mongolia: Composition, age and phytogeographic position // *Review of Paleobotany and Palynology*. – 2013. – V. 193. – P. 82–98.
12. Kostina E.I., Herman A.B., Kodrul T.M. Early Middle Jurassic (possibly Aalenian) Tsagan-Ovoo Flora of Central Mongolia // *Review of Paleobotany and Palynology*. – 2015. – V. 220. – P. 44–68.
13. Kostina E.I., Herman A.B. Middle Jurassic Floras of Mongolia: Composition, Age, and Phytogeographic Position // *Paleontological Journal*. – 2016. – V. 50. – № 12. – P. 1437–1450.
14. Фролов А.О., Мацук И.М. Реконструкция среднеболотной растительности по результатам исследования фитоориктоценозов из присаянской свиты (Иркутский угленосный бассейн) // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология»*. – 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 3–10.
15. Киричкова А.И., Батяева С.К., Быстрицкая Л.И. Фитостратиграфия юрских отложений юга Западной Сибири. – М.: Недра, 1992. – 216 с.
16. Рычкова С.В. Эволюция представлений о трансгрессии моря на юге Западной Сибири в байосе и келловее // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2012. – Т. 1. – № 2. – С. 73–77.
17. Быстрицкая Л.И., Рычкова И.В. Новые находки папоротников из среднеюрских отложений Обь-Тазовской фациальной области Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета*. – 2013. – № 367. – С. 170–176.
18. Быстрицкая Л.И. Новые виды растений из юрских отложений Западно-Сибирской равнины (Томская область) // *Материалы по палеонтологии и стратиграфии Западной Сибири*. – Томск, 1992. – С. 58–60.
19. Рычкова И.В., Быстрицкая Л.И. Наунакский комплекс растений Усть-Тымской впадины юго-востока Западной Сибири // *Успехи современного естествознания*. – 2015. – № 5. – С. 175–177.
20. Шамина М.И., Рычкова И.В., Гладков Е.А. Литогеохимические и биостратиграфические особенности тюменской и наунакской свит (юго-восток Западной Сибири) // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 8. – С. 42–46.
21. Shaminova M., Rychkova I., Sterzhanova U. Paleogeographic and litho-facies formation conditions of MidUpper Jurassic sediments in S-E Western Siberia (Tomsk Oblast) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 43: Problems of Geology and Subsurface Development. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012001/pdf> (дата обращения 01.02.2018).
22. Lithologic-facial, geochemical and sequence-stratigraphic sedimentation in Naunak suite (south-east Western Siberia) / M. Shaminova, I. Rychkova, U. Sterzhanova, T. Dolgaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21: XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: Problems of Geology and Subsurface Development 7–11 April 2014, Tomsk, Russia. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/21/1/012001/pdf> (дата обращения 01.02.2018).
23. Lithologic-facies and paleogeographic features of Mid-Upper Jurassic oil-gas bearing sediments in Nurolsk depression (Western Siberia) / I. Rychkova, M. Shaminova, U. Sterzhanova, A. Baranova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27: Problems of Geology and Subsurface Development. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/27/1/012009/pdf> (дата обращения 01.02.2018).
24. Shepard P.E. Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sedimentary environments // *Deltaic and shallow marine sediments* / Ed. L.M.U. Van Straaten. – Amsterdam: Elsevier, 1964. – P. 1–25.

Поступила 07.02.2018 г.

#### Информация об авторах

**Рычкова И.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шамина М.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 561:571.762(571.1)

## PALEOBOTANICAL FEATURES OF TYUMEN AND NAUNAK FORMATIONS (MIDDLE-UPPER JURASSIC OF THE SOUTH-EAST OF WEST SIBERIA)

Irina V. Rychkova<sup>1</sup>,  
irina.rychkova@mail.ru

Marina I. Shaminova<sup>1</sup>,  
mshaminova@mail.ru

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

**The relevance.** Traditional use of data of geophysical researches of wells for stratigraphic subdivision and correlation of stratigraphic units of the South-East of Western Siberia is not always possible to confidently draw boundaries between lithological similar deposits. In this relation the difficulties in constructing geological models of fields occur, that can result in inefficient exploration and increase in cost of development of deposits of hydrocarbon raw materials.

**The aim** of the research is to form complexes of plants typical for the Tyumen and Naunak formations for biostratigraphic subdivision and correlation of oil-productive deposits of the South-East of Western Siberia (areas Snezhnaya and Dvoynaya).

**Objects:** paleobotanical remains from the core of boreholes in Snezhnaya and Dvoynaya areas, as well as the published material from previous studies.

**Methods.** To determine the imprints of plants the authors have used the comparative morphological and epidermal-cuticular methods. Imprints of fossil plants were studied under binocular microscope MBS-1 and LOMO. For stratigraphic division and correlation of sediments the method of complex analysis of organic residues was applied.

**Results.** The authors studied paleobotanical material from the middle-upper-Jurassic deposits of southeastern West Siberia (Snezhnaya and Dvoynaya) and determined distribution of plant taxa to certain strata (the Tyumen and Naunak). It was found out that ferns *Coniopteris* and *Raphaelia diamensis vialovae* and gymnosperms *Czekanowskiales Phoenicopsis mogutchevae*, *Czekanowskia rigida* and *Cz. irkutensis* are typical for the Tyumen formation. The endemic ferns *Coniopteris latilobus* and gymnosperms *Czekanowskiales Czekanowskia tomskiensis* and widespread coniferous *Podozamites eichwaldii* are typical for Naunak formation. Endemic structure of Naunak plant complex flora points to the specific conditions of Naunak strata formation. The stratigraphic units similar in lithological composition were separated. The authors developed the reliable base for stratigraphic division and correlation, which will be the base for construction of reliable geological model of deposits. This will result in more effective exploration in the South-East of Western Siberia.

### Key words.

South-East of Western Siberia, middle-upper Jurassic, Naunak formation, Tyumen formation, paleobotanical remains.

The authors appreciate Lyudmila I. Bystritskaya, Cand. Sc., for paleobotanical material in Western Siberia.

### REFERENCES

1. Beyzel A.L., Alifirov A.S. O vozmozhnosti vydeleniya analogov vasyuganskogo, georgievskogo i chastichno bazhenovskogo gorizontov Zapadnoy Sibiri v stratotipicheskikh razrezakh kellovskogo, oksfordskogo i kimeridzhskogo yarusov Yuzhnoy Anglii [On the possibility of separating the analogues of Vasyugan, George and partially Bazhenov horizons of Western Siberia in the stratotype sections of the Callovian, and Kimmeridgian Oxford tier southern England]. *Fatsialny analiz v neftegazovoy litologii: trudy II Regionalnogo soveshchaniya, posvyashchennogo 100-letiyu so dnya rozhdeniya d.g.-m.n. L.N. Botvinkinoy* [Facies analysis in oil and gas lithology. Proc. of the II Regional meeting dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of Dr. Sc. L.N. Botvinkina]. Tomsk, CPPS ND Publ., 2012. pp. 199–205.
2. Shurygin B.N., Nikitenko B.L., Devyatov V.P. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Yurskaya sistema* [Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Jurassic system]. Novosibirsk, SO RAN, filial «GEO» Publ., 2000. 480 p.
3. *Resheniya 6-go Mezhdedomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu utochnennykh stratigraficheskikh skhem mezozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Decisions of the 6<sup>th</sup> interdepartmental stratigraphic meeting on consideration and adoption of refined stratigraphic schemes of Mesozoic deposits in Western Siberia]. Novosibirsk, 2003. 114 p.
4. Kirichkova A.I., Chizhova V.A., Stashkova E.K., Fortunatova N.K., Shurygin B.N. Stratigraphy in petroleum Geology: research methodology and current problems. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, vol. 2, pp. 134–156. In Rus. Available: <http://www.ngtp.ru/rub/2/007.pdf> (accessed 1 February 2018).
5. Kirichkova A.I., Kostina E.I., Bystritskaya L.I. *Fitostratigrafiya i flora yurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [Phytostratigraphy and flora of Jurassic deposits in Western Siberia]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 378 p.
6. Kirichkova A.I., Bystritskaya L.I., Travina T.A. Rod Coniopteris i chekanovskievye v yurskoy flore Zapadnoy Sibiri i ikh znachenie dlya stratigrafii [The genus Coniopteris and Czekanowskiales in the Jurassic flora of Western Siberia and their significance for stratigraphy]. *Evolutsiya zhizni na Zemle. Materialy simpoziuma* [Evolution of life on the Earth. Proc. of the Symposium]. Tomsk, TGU Publ., 2001. pp. 353–354.
7. Kirichkova A.I., Bystritskaya L.I., Travina T.A. The value of Coniopteris and Czekanowskiales for the stratigraphy of continental Jurassic in West Siberia *Stratigraphy. Geological Correlation*, 2002, vol. 10, no. 3, pp. 35–52. In Rus.
8. Rychkova I.V. Paleobotanical characteristics of the Tyumen suite of the middle Jura (Tomsk region). *Non-Periodic attachment to the journal «Lethaea rossica. Russian paleobotanical journal»*, 2013, vol. 1, pp. 132–136. In Rus.
9. Sun G., Miao Y., Mosbrugger V., Ashraf A.R. The Upper Triassic to Middle Jurassic strata and floras of the Janggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Palaeobio Palaeoeny*, 2010, vol. 90,

- pp. 203–214. DOI: 10.1007/s12549-010-0039-8. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12549-010-0039-8.pdf> (accessed 1 February 2018).
10. Hinz J.K., Smith I., Pfretzschner H.-U., Wings O., Sun G. A high resolution three-dimensional reconstruction of a fossil forest (Upper Jurassic Shishugou Formation, Junggar Basin, Northwest China). *Palaeobio Palaeoeny*, 2010, vol. 90, pp. 215–240. DOI: 10.1007/s 12549-010-0036-y. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12549-010-0036-y.pdf> (accessed 1 February 2018).
  11. Kostina E.I., Herman A.B. The Middle Jurassic flora of South Mongolia: Composition, age and phytogeographic position. *Review of Paleobotany and Palynology*, 2013, vol. 193, pp. 82–98.
  12. Kostina E.I., Herman A.B., Kodrul T.M. Early Middle Jurassic (possibly Aalenian) Tsagan-Ovoo Flora of Central Mongolia. *Review of Paleobotany and Palynology*, 2015, vol. 20, pp. 44–68.
  13. Kostina E.I., Herman A.B. Middle Jurassic Floras of Mongolia: Composition, Age, and Phytogeographic Position. *Paleontological Journal*, 2016, vol. 50, no. 12, pp. 1437–1450.
  14. Frolov A.O., Mashchuk I.M. Reconstruction srednesrochnoi vegetation according to the study of fitoaleksinov presayan uplift of suites (Irkutsk coal-bearing basin). *Proceedings of the Irkutsk state University. Series «Biology. Ecology»*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 3–10. In Rus.
  15. Kirichkova A.I., Batyaeva S.K., Bystritskaya L.I. *Fitostratigrafiya yurskikh otlozheny yuga Zapadnoy Sibiri* [Phytostratigraphy of Jurassic deposits in the South of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 216 p.
  16. Ryzhkova S.V. The evolution of ideas about the transgression of the sea in the South of Western Siberia in the Bajocian and Callovian. *Interexpo Geo-Siberia*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 73–77. In Rus.
  17. Bystritskaya L.I., Rychkova I.V. New finds of ferns from the middle Jurassic deposits of the Ob-Taz region of Western Siberia. *Bulletin of Tomsk State University*, 2013, vol. 367, pp. 170–176. In Rus.
  18. Bystritskaya L.I. Novye vidy rasteny iz yurskikh otlozheny Zapodno-Sibirskoy ravniny (Tomskaya oblast) [New plant species from Jurassic deposits of the West Siberian plain (Tomsk region)]. *Materialy po paleontologii i stratigrafii Zapodnoy Sibiri* [Materials on paleontology and stratigraphy of Western Siberia]. Tomsk, 1992. pp. 58–60.
  19. Rychkova I.V., Bystritskaya L.I. Naunak plant complex of Ust-Tim depression in the South-East of Western Siberia. *Advances in current natural Sciences*, 2015, no. 5, pp. 175–177. In Rus.
  20. Shaminova M.I., Rychkova I.V., Gladkov E.A. Litho-geochemical and biostratigraphic features of Tyumen and Naunak suites (South-East of Western Siberia). *Oil industry*, 2017, no. 8, pp. 42–46. In Rus.
  21. Shaminova M., Rychkova I., Sterzhanova U. Paleogeographic and litho-facies formation conditions of MidUpper Jurassic sediments in S-E Western Siberia (Tomsk Oblast). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Problems of Geology and Subsurface Development*, 2016, vol. 43. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012001> (accessed 1 February 2018).
  22. Shaminova M., Rychkova I., Sterzhanova U., Dolgaya T. Litho-geo-facial, geochemical and sequence-stratigraphic sedimentation in Naunak suite (south-east Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Problems of Geology and Subsurface Development*, 2014, vol. 21. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012001> (accessed 1 February 2018).
  23. Rychkova I., Shaminova M., Sterzhanova U., Baranova A. Lithologic-facies and paleogeographic features of Mid-Upper Jurassic oil-gas bearing sediments in Nurolsk depression (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Problems of Geology and Subsurface Development*, 2015, vol. 27. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012009> (accessed 1 February 2018).
  24. Shepard P.E. Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sidimentary environments. *Deltaic and shallow marine sediments*. Ed. by L.M.U. Van Straaten. Amsterdam, Elsevier, 1964. pp. 1–25.

Received 07 February 2018.

#### Information about the authors

**Irina V. Rychkova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Marina I. Shaminova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 624.131

## ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ В ТОМСКЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА, ОСНОВАННОГО НА СОЧЕТАНИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Епифанова Екатерина Александровна<sup>1</sup>,  
epifanova@tpu.ru

Строкова Людмила Александровна<sup>1</sup>,  
sla@tpu.ru

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

**Актуальность** темы обусловлена необходимостью совершенствования подходов к оценке и прогнозу деформаций при сохранении исторических зданий. Решение этой задачи сопряжено с многими неопределенностями, такими как недостаток исходных данных по геологии и проектным решениям объекта, ограничения при отборе образцов строительных материалов и грунтов для более точного определения их нынешних физико-механических свойств, слабая разработанность теоретических положений по выполнению работ. В статье освещено изучение инженерно-геологических условий территории при реконструкции Томского театра юного зрителя. Особенности реконструкции сооружения связаны с непрекращающимися деформациями основания, сложностью режима подземных вод, нарушением природного сложения грунтового массива и физико-механических свойств. Это потребовало актуализации расчетной модели для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

**Целью** исследования является численная оценка напряженно-деформированного состояния грунтового основания исторического сооружения и роли лазерного сканирования в получении данных по деформациям объекта.

**Объект исследования:** локальная литотехническая система взаимодействия «основания–грунт» в пределах исторической застройки территории г. Томска, по пер. Нахановича, 4.

**Методика исследования.** Исходными данными для моделирования поведения грунтового массива послужили региональные геологические материалы, а также полевые данные, полученные в разные годы. Выполнено рекогносцировочное обследование участка. Для характеристики напряженно-деформированного состояния грунтового массива использовался программный комплекс на базе метода конечных элементов. Для оценки деформаций и построения точной трехмерной модели объекта наблюдения использовалась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта проводилось лазерным 3D сканером Leica Scanstation C10, плано-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, обработка массива точек проводилась в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, трехмерное моделирование объекта было осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

**Результаты.** Оценены инженерно-геологические условия участка изысканий. Создана цифровая расчетная модель. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании. Совместное рассмотрение геологического разреза и систем трещин, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствует о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали вдоль реки Томь. Концентрация трещин связана с пристройками с западной и восточной сторон здания. Деформации в зоне сочленения разновременных построек максимальны, т. к. пристройки опираются на фундамент с меньшей глубиной заложения. Продолжающиеся во времени деформации, вероятно, связаны с ползучестью органоминеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых в непосредственной близости от здания.

### Ключевые слова:

Грунт, лазерное сканирование, моделирование, деформации, механические свойства, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов (МКЭ), культурное наследие.

### Введение

Инженерно-геологическими исследованиями исторических объектов, в т. ч. архитектурных памятников и ансамблей в России с 1970-х гг., занимается широкий круг исследователей: Г.С. Белова, М.В. Бондарев, О.Е. Вязкова, Р.Э. Дашко, И.А. Дёмкин, В.В. Дмитриев, О.В. Домарёв, Л.В. Заботкина, А.А. Никифоров, В.Л. Невечеря, В.М. Кувшинников, А.Г. Купцов, Л.В. Курделова, В.Е. Ольховатенко, Е.М. Пашкин, В.О. Подборская, В.В. Пономарёв, Е.И. Романова, С.Н. Чернышёв, А.Г. Шашкин и другие [1–3]. Результатами этих исследований явилось установление особенностей взаимодействия исторических объектов с окружающей средой, комплексирования методов при изучении состава, состояния, физико-механических свойств компонентов литотех-

нической системы. К сожалению, анализ имеющихся исследований позволяет констатировать слабую разработанность правовых и методических основ инженерно-геологических исследований таких объектов.

Здание (ТЮЗ) расположено по пер. Нахановича, 4 (бывший переулок Ямской до 20.05.1920 г., рис. 1). Площадка непосредственно примыкает к защитной дамбе г. Томска, находится на правом берегу р. Томь южнее устья р. Ушайки (рис. 1).

История объекта началась в 1912 г. На Конной площади, вблизи извозчицкой биржи, где велась торговля лошадьми, открылся крупнейший в Томске театр-синемаграф «Новый». Первым владельцем здания был известный томский купец А.Ф. Громов [4]. Проект здания выполнил архитектор Андрей Лангер в стиле модерн.



Рис. 1. Переулок Ямской в начале прошлого века

Fig. 1. Yamskoy lane at the beginning of the last century



Рис. 2. Местоположение объекта

Fig. 2. Object location

Первоначальный объем включал в себя помещения самого кинозала и вестибюля. До 1926 г. здание эксплуатировалось без надлежащего ремонта, что привело к ветхому аварийному состоянию. В 1930 г. полуразрушенный кинотеатр был восстановлен, и с середины 30-х гг. здание используется как театр, в 1937 г. к основному зданию сделали пристройку сцены с восточной стороны. В 1950-х гг. была проведена реконструкция те-

атра, в результате которой был изменён внешний вид здания. Были выполнены пристройки с северной и западной сторон, утрачены башни главного фасада с купольным завершением, а также лепнина на фасадах и в интерьере. Схема плана по периодам строительства здания показана на рис. 3.

Сегодня здание ТЮЗа представляет собой трехэтажное кирпичное оштукатуренное здание, переменной этажности: трехэтажное в основной ча-





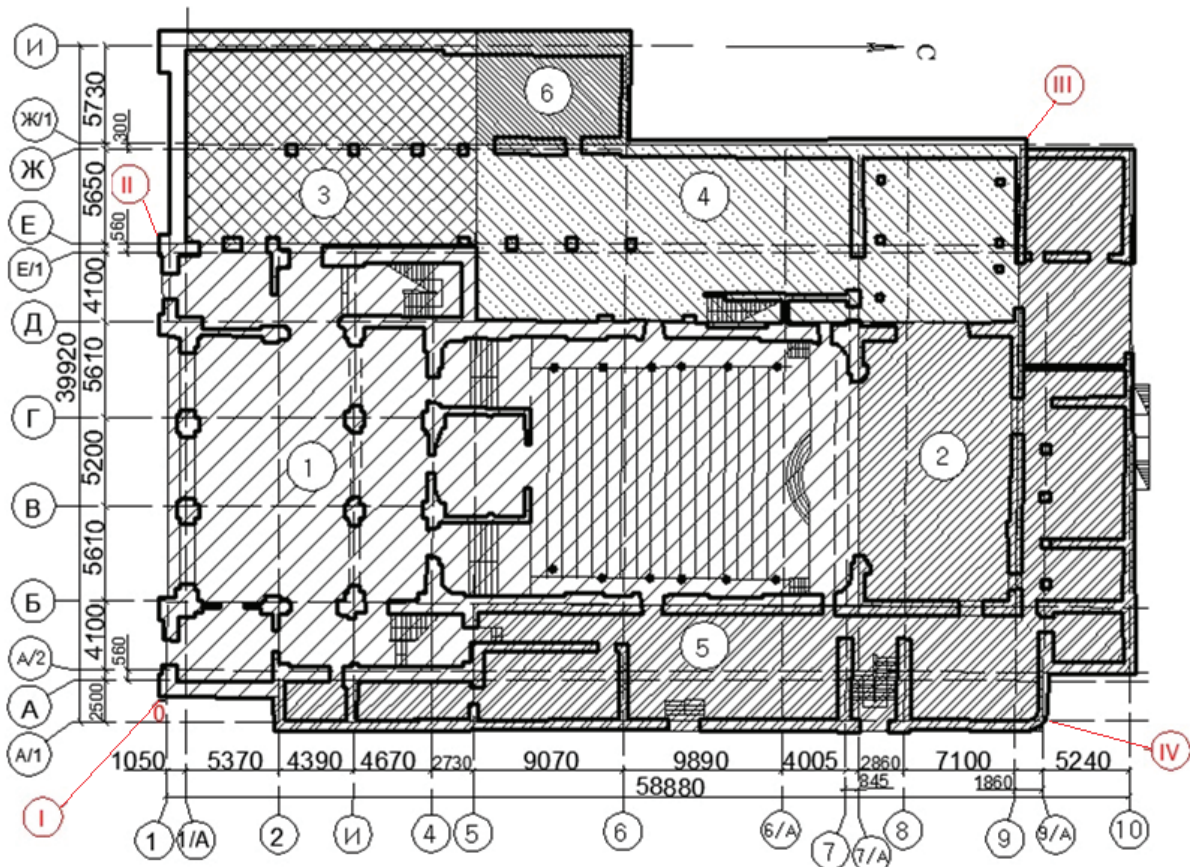
**Рис. 3.** Первоначальный вид здания

**Fig. 3.** Original appearance of the building

сти здания с двухсветным пространством в вестибюле и зрительном зале, двухэтажное с западного и восточного фасадов; без подвала, прямоугольное в плане, размером 58,85×40,71 м. Имеется техническое подполье. Планировочная схема здания выполнена с четко выраженной типологией размещения помещений для театра. Основное планировочное ядро – зрительный зал и сцена. Зрительный зал имеет балконы. Главные входы в здание ориентированы на пер. Нахановича. Основными помещениями 1-го этажа являются: вестибюль, зрительный зал и двухсветное фойе с витражами. Основными помещениями, разместившимися на втором этаже, стали: открытая галерея с буфетом и входами на балкон зрительного зала, а также малая сцена. На третьем этаже – репетиционный зал и входы на балкон. В объеме здания находятся три основных лестничных клетки открытого типа. В 2007 г. начался последний капитальный ремонт всего сооружения без изменения границ, планировки и высотности. Проектная документация разработана в 2002 г. НПЦ «Вогтехпроект». В последующие годы (2009–2011 гг.) документация была дополнена и откорректирована ООО «Генстройпроект». Проект по переоснащению сцены большого зала, систем свето- и звукооснащения разработан в 2011 г. ООО «Система». Сложилось так, что ремонтно-реставрационные работы здания ТЮЗа выполнялись в несколько этапов: на первом этапе (2004–2010 гг.) были отремонтирова-

ны инженерные сети: отопление, водопровод и канализация, отремонтирована кровля и помещения, предназначенные для работы театральной труппы. На втором этапе (2011–2012 гг.) отремонтированы помещения вестибюля и малой сцены, выполнено полное техническое переоснащение сцены большого и малого залов, восстановлена лепнина в большом зале, отремонтировано главное фойе театра.

Конструктивная схема здания смешанная, выполнена с несущими внутренними и наружными стенами как продольными, так и поперечными. В отдельных помещениях имеются столбы. Фундаменты здания преимущественно ленточные, мелкого заложения, бутовые и бетонные. Перекрытия деревянные, металлодеревянные и железобетонные. Крыша чердачная, скатная, разноуровневая, сложная в плане, с покрытием из оцинкованной кровельной стали. При реконструкции объекта проектировщики не занимались вопросами укрепления фундаментов и основания сооружения, поэтому специальные инженерно-геологические и геотехнические исследования не проводились, и такие вопросы, как геометрические размеры фундамента, механические свойства горных пород в сфере взаимодействия, остались не изученными. Подобные вызовы часто встречаются при реконструкции именно исторических сооружений, по сравнению с современными зданиями.



**Рис. 4.** Схема плана по периодам строительства: 1 – постройка 1912 г. – бывший кинотеатр «Новый», выполненный по проекту архитектора А. Лангера; 2 – граница постройки 1937 г. – пристраивается сцена; здание функционирует как театр; 3–6 – границы постройки после реконструкций 50-х гг. (точные даты не установлены); I–IV – углы здания, взятые для расчета деформаций

**Fig. 4.** Scheme plan for construction periods: 1 is the building in 1912 – the former cinema «Novy», made by architect A. Langer; 2 is the border of the construction in 1937 – the stage was added, the building functions as a theater; 3–6 are the boundaries of the building after renovations of 1950-s (exact dates are not determined); I–IV are the corners of the building, taken for deformation analysis

#### Изученность инженерно-геологических условий района

В начале прошлого века для возведения зданий в Томске специальные геологические исследования для расчетов фундаментов практически не проводились. Не было вплоть до 50-х гг. XX в. и специальных изыскательских организаций в городе, способных дать квалифицированные заключения о геологических условиях строительства для обоснования типов фундаментов и их расчетов [5]. В 30–50-е гг. сотрудники Томского политехнического университета (кафедры гидрогеологии и инженерной геологии (ГИГ) и методики разведки) проводили разведочные работы – бурение скважин, проходку шурфов. По результатам проведения работ сотрудниками кафедры ГИГ – В.А. Нуднером, Ф.П. Нифонтовым, С.А. Левиным, а позже Г.А. Сулакшиной, Л.А. Рождественской, выдавались заключения о несущей способности и деформируемости пород для выбора типа фундаментов зданий и их расчетов, а также разработки мероприятий, требуемых для обоснования инженерной

подготовки территорий застройки. В 1966 г. в кандидатской диссертации Л.А. Рождественской впервые детально охарактеризованы инженерно-геологические условия г. Томска, выполнена типизация геологической среды с целью выбора типов фундаментов сооружений, составлены инженерно-геологическая и геоморфологическая карты города масштаба 1:10000 и сформулированы методические рекомендации по инженерно-геологическим исследованиям городских территорий для наземной застройки. Инженерно-геологическая карта была передана в отдел архитектуры Томского горисполкома для составления генерального плана застройки и реконструкции города, а также в проектные организации города: ТомГЭП, Томгипротранс, ТомскГИСИЗ, ТИСИ, и использована в практической работе.

На прилегающей к объекту территории начиная с 1960-х гг. выполнялись инженерно-геологические и гидрогеологические работы, большей частью связанные с защитой территории города от затопления [6].



В 1966 г. Институт «Гипрокоммунстрой» (г. Москва) подготовил «Заключение об инженерно-геологических условиях строительства набережной на р. Томи и р. Ушайки в г. Томске».

Этот участок входил также в площадь комплексных инженерно-геологических и гидрогеологических съемок М 1:200000 (Нелюбинская партия ТКГРЭ, 1973–1975 гг.) и М 1:50000 (Рыбаловская партия ТКГРЭ, 1978–1983 гг.).

В 1978–1981 гг. Институтом «Томскгипроводхоз» выполнена работа «Оценка последствий русловой добычи песчано-гравийной смеси на уровне режим грунтовых вод поймы реки Томи и экологический ущерб на сельскохозяйственное производство». Результатом этой работы явилось установление бесспорного факта площадного снижения уровня грунтовых вод пойменных отложений реки Томи и снижения уровня реки Томи в черте города Томска в связи с добычей песчано-гравийной смеси из русла реки.

В 1989 г. Томский трест инженерно-строительных изысканий «ТомскТИСИЗ» подготовил «Отчет о комплексных инженерных изысканиях для строительства набережной на р. Томи от устья р. Ушайки по ул. Береговой в г. Томске» (Стадия: рабочий проект)

В 1994–1996 гг. Институтом проблем коммунального хозяйства районов Сибири, Севера и Дальнего востока выполнена тематическая работа «Оценка техногенных условий подтопления территорий Московского тракта, мкр. Черемошники г. Томска и разработка схемы защитных инженерно-технических мероприятий». В данной работе обобщены все имеющиеся материалы прошлых лет по инженерной геологии и гидрогеологии с составлением карт: почвенной, растительности, геолого-литологической и гидрогеологической М 1:10000.

В 2003 г. ОАО «Томскводпроект» выполнило изыскания «Реконструкция ограждающей дамбы г. Томска Томской области». Рабочий проект. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования.

В 2005 г. ОАО «Сибречпроект» выполнило изыскания по теме «Расширение моста и восстановление набережной реки Ушайки в г. Томске (2 этап). Рабочая документация. Отчет по инженерным изысканиям, выполненным в 2003 году».

В 2015 г. ОАО «Томгипротранс» выполнило изыскания по теме «Защита территорий г. Томска на правом берегу р. Томи от коммунального моста до устья р. Ушайки от негативного воздействия вод», в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов Томской области в 2013–2020 годах».

В перечисленных материалах обобщаются имеющийся материал по инженерной геологии и гидрогеологии, включая физико-механические, фильтрационные и емкостные свойства грунтов района. При этом следует отметить, что некоторые материалы требуют корректировки.

## Характеристика инженерно-геологических условий района

Рельеф и климатические характеристики

В геоморфологическом отношении район представляет террасированную озерно-аллювиальную равнину. По климатическому районированию г. Томск, согласно СНиП 23–01–99\* для строительства, относится к подрайону – IV, в зоне с резко континентальным климатом, с продолжительной суровой зимой и коротким, но теплым летом. В течение года наблюдаются значительные колебания температуры воздуха. Среднегодовая температура воздуха минус 0,5 °С. Самый холодный месяц – январь, со среднемесячной температурой воздуха –19,1 °С, самый теплый месяц – июль, со среднемесячной температурой +18,3 °С. Количество осадков за холодный период (ноябрь–март) – 185 мм, за теплый период (апрель–октябрь) – 406 мм. Суточный максимум осадков в теплый период составляет 76 мм. Преобладающее направление ветра – южное [6]. Среднее число дней со снежным покровом – 178. Средняя дата появления снежного покрова – 15 октября, средняя дата образования устойчивого снежного покрова – 27 октября, средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова – 18 апреля, средняя дата схода снежного покрова – 30 апреля. Среднее число дней с метелью в год составляет 46.

Гидрография и гидрология

Главной водной артерией г. Томска является река Томи с ее притоками – Басандайкой, Ушайкой, М. Киргизкой, Керепеть. Река Томи – правый приток реки Оби – относится к категории больших рек. Длина реки 840 км. Ширина до 400 м. Глубина реки составляет 2...8 м. Реки извилисты, с малыми уклонами. Режим рек равнинного типа, с характерным весенне-летним половодьем, которое начинается в конце апреля, и редкими паводками в летне-осенний период. Питание рек в основном осуществляется за счет дождевых и снеговых осадков (около 50 % водосбора) и подземных вод. Появление первых ледяных образований наблюдается в октябре (средняя дата приходится на 19 октября). При раннем похолодании они могут наблюдаться в первой декаде октября, при позднем наступлении зимы – в первых числах ноября. Средняя дата наступления ледостава приходится на 1 ноября. Средняя продолжительность ледостава – 170 дней, а всех ледовых явлений – 190 дней. Средняя дата вскрытия приходится на 20 апреля. Средняя дата окончания ледовых явлений приходится на 23 апреля, наиболее ранняя – на 12 апреля, наиболее поздняя – на 3 мая. Период реки, свободной ото льда, длится 167...204 дня.

Геологическое строение

В тектоническом отношении территория изысканий находится в пределах Кольвань-Томской складчатой зоны. Согласно *Карте инженерно-гео-*

логического районирования Томского Приобья масштаба 1:500000, составленной Л.А. Строковой (1996), на данной территории выделяют две крупные инженерно-геологические области, различающиеся по направленности и характеру неотектонических движений, рельефу, строению и мощности четвертичных отложений: А – область долины р. Оби и ее крупных притоков – рек Томи и Шегарки; Б – Обь-Иртышская область [7]. В пределах областей по различиям в возрасте и генезисе геоморфологических типов выделены подобласти. Подобласти обособляют территории с принципиально различной дренированностью, гидродинамической характеристикой грунтовых вод и типом их режима, морфометрическими характеристиками мезорельефа, разновидностью и интенсивностью современных геологических процессов, характером почвенного покрова.

Территория участка, согласно Карте инженерно-геологического районирования Томского Приобья, входит в область А, внутри которой выделены четыре подобласти: три надпойменных и пойменная террасы.

Третья надпойменная терраса р. Томи развита локально, с абсолютными отметками 97...119 м. Густота расчленения составляет 0,6...1,25 км/км<sup>2</sup>, глубина расчленения 20...60 м/км<sup>2</sup>. Уклоны поверхности более 6°. Терраса хорошо выражена в рельефе. От прилегающих к ней водоразделов и более низких террас она большей частью отделена пологим уступом.

У р. Томи вторая надпойменная терраса высотой 8...13 м и шириной 0,5...8 км по левобережью встречается почти повсеместно, по правобережью сохранилась фрагментарно. Геологический разрез террасы обычно представлен переслаиванием суглинков, супесей, подстилаемых песками разной зернистости.

Первая надпойменная терраса сохранилась лишь отдельными фрагментами. Относительная высота террасы 10...12 м. Изучаемый объект расположен на первой надпойменной террасе р. Томи.

Правобережная пойменная терраса р. Томи на участке ограждающей дамбы имеет ширину от 0,6 до 3,5 км. Общая высота прирусловой террасы составляет 78,5...81 м при отметках меженного уровня воды р. Томи 67,7 м. Мощность отложений пойменной террасы колеблется от 12...15 до 20...26 м, при этом уменьшение мощности происходит по направлению от русла к тыловой части террасы. Пойменные отложения подстилаются глинистыми сланцами палеозойского фундамента с абсолютными отметками их кровли 64,0...67,5 м. В литологическом отношении отложения поймы представлены преимущественно трехслойной толщей. Верхний слой практически повсеместно представлен техногенными грунтами площадной отсыпки мощностью от 0,6...1,0 до 7...8 м при средней мощности 2...3 м. Средний слой сложен глинистыми грунтами, мощность которых колеблется от 2...4 до 10 м при средней мощности 6...7 м. Нижний слой

представлен гравийно-галечниковым грунтом с преимущественно песчаным заполнителем. Мощность слоя от 2 м (в южной части) до 11...17 м [7].

#### Гидрогеологические условия

Террасовый комплекс играет важную аккумуляющую и регулирующую роль в поверхностном стоке реки Томи. Гидрогеологические условия на рассматриваемой территории характеризуются распространением здесь единого четвертично-палеозойского водоносного комплекса. Песчано-гравийные отложения пойменной террасы залегают на глинистых сланцах нижнего карбона без глинистого разделяющего слоя. При этом имеющиеся материалы (Ключевская партия ТКГРЭ, А.Ф. Саблин, 1980–1988 гг.) свидетельствуют о том, что водопроводимость палеозойского водоносного горизонта здесь не превышает 5 м<sup>2</sup>/сут. Коэффициент фильтрации глинистых сланцев при средней мощности трещиноватой зоны 25...30 м составляет 0,16...0,2 м/сут, т. е. глинистые сланцы для четвертичного водоносного горизонта пойменной террасы являются водоупором [6].

На участке ограждающей дамбы водовмещающими грунтами являются гравийно-галечниковые отложения. Пески и супеси здесь развиты лишь на отдельных участках и представлены небольшими маломощными линзами. Водоносный горизонт двухслойный с верхним суглинистым слоем мощностью до 3...5 м. Суглинки практически повсеместно обводнены, при этом статические уровни грунтовых вод суглинков совпадают с пьезометрическим (статическим) уровнем грунтовых вод гравийно-галечниковых отложений, образуя напорно-безнапорный горизонт подземных вод пойменной террасы.

Следует отметить, что длительная выборка гравийно-песчаной смеси из русла реки у г. Томска оказала заметное влияние на уровенный режим. Так, отметка максимального паводкового уровня 1 % обеспеченности в расчетном створе города Томск (пристань) до 1962 г. составляла 80,71 м, а за период с 1962 по 2003 гг. стала 78,01 м, т. е. величина снижения максимального паводкового уровня составляет 2,7 м. Аналогическая ситуация наблюдается также со среднегодовыми, минимальными, среднемаксимальными уровнями.

#### Геологические и инженерно-геологические процессы

Изучению основных закономерностей развития геологических процессов и различных аспектов их проявления на территории г. Томска посвящены работы А.А. Земцова (1970, 1972, 1976), Н.С. Евсеевой (1980, 1990), Т.Я. Емельяновой (1999), С.Б. Ершовой (1973, 1977), В.А. Льготина (1990), З.И. Ястремской (1980) и многих других.

В пределах города широким развитием пользуются различные неблагоприятные процессы и явления. К их числу относятся: суффозия, оползни, овраги, речная эрозия, заболачивание, морозное пучение, подтопление и другие [5, 7].

Суффозионные процессы отмечаются на участках сосредоточенной разгрузки подземных вод в пределах долин р. Томи и Ушайки. В рельефе они выражены в виде суффозионных цирков с сосредоточенным выходом подземных вод.

Оползни имеют широкое развитие на территории г. Томска. Они приурочены к береговым склонам р. Томи и Ушайки. Основными причинами оползней являются: высота и крутизна склонов (36...40°) их обводненность, подрезка, нагрузка, динамическое воздействие транспорта и др.

Речная эрозия наиболее активно проявляется в паводковый период.

Морозное пучение проявляется на переувлажненных участках с близким залеганием подземных вод и наличием пылевато-глинистых грунтов. Возникающие при глубоком сезонном промерзании нормальные и касательные силы морозного пучения способствуют деформации фундаментов и несущих конструкций сооружений.

Свойства горных пород

Характеристика свойств грунтов основания приводится по данным изысканий 2014 г. Участок сложен техногенными, аллювиальными, элювиальными и скальными грунтами. Изучена толща грунтов до глубины 21,0 м.

По результатам полевых, лабораторных работ и последующей камеральной обработки в разрезе обследуемого участка выделено 5 инженерно-геологических элементов. Классификация грунтов принята по ГОСТ 25100–2011 г.

*Техногенные грунты (t)* представлены гравийными грунтами (ИГЭ-1), влажными, с песчаным заполнителем до 40 %, содержание фракции менее 2 мм колеблется от 12,3 до 49,3 % при среднем значении 32,2 %, удельное сцепление 3 кПа; угол внутреннего трения 36°; модуль деформации 43 МПа [6].

Скважинами 10 и 11, находящимися в 5 м на юго-запад и 7 м на северо-запад от здания, пробуренными в 1966 г. Институтом «Гипрокоммунстрой» в основании техногенных грунтов, вскрыт слой навоза с плохо перегнившей соломой, древесной, супесью, сильно влажный, мощностью 1,3 и 1,7 м соответственно. Биогенные отложения – сильноразложившийся навоз – мощностью до 2 м вскрыты также скважиной 8867, находящейся в 10 м на запад от здания, пробуренной в 1989 г. «ТомскГИСИзом». Наличие этого слоя связано с историей участка в XVIII–XIX вв., это была Конная площадь, где велась торговля лошадьми и размещалась извозчицья биржа.

*Аллювиальные грунты (a)*: представлены глинистыми грунтами текучепластичной консистенции с содержанием органических веществ (ИГЭ-2) и гравийными грунтами (ИГЭ-3).

ИГЭ-2 – суглинок аллювиальный текучепластичной консистенции с примесью органических веществ – имеет ограниченное распространение, залегает с поверхности, мощность слоя колеблется

от 1,5 до 6,0 м, характеризуется естественной влажностью от 27,9 до 51,0 % при среднем значении 40,7 %, плотность грунта естественного сложения от 1,79 до 2,06 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 1,87 г/см<sup>3</sup>, значение коэффициента пористости в пределах 0,97...1,0, при среднем значении 1,0. Содержание органического вещества от 0,03 до 0,095 д.е. при среднем значении 0,066 д.е., удельное сцепление 14 кПа; угол внутреннего трения 15°; модуль деформации 2,4 МПа. По степени морозной пучинистости грунты относятся к чрезмернопучинистым.

ИГЭ-3. Гравийный грунт аллювиальный водонасыщенный с супесчаным заполнителем, характеризуется естественной влажностью от 23,5 до 33,2 % при среднем значении 27,7 %, содержание фракции менее 2 мм изменяется от 3,7 до 49,9 % при среднем значении 30,6 %, удельное сцепление 3 кПа; угол внутреннего трения 36°; модуль деформации 46 МПа.

*Элювиальные грунты (e)*: представлены тонко- и мелкообломочной зоной выветривания (ИГЭ-4). По ГОСТ 25100–2011 суглинок элювиальный легкий песчанистый полутвердой консистенции, имеет повсеместное распространение, пройденная мощность от 3 до 13 м. Характеризуется естественной влажностью от 17,0 до 31,3 % при среднем значении 22,2 %, плотностью грунта естественного сложения от 1,81 до 2,14 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 1,99 г/см<sup>3</sup>, значением коэффициента пористости в пределах 0,50...0,95, при среднем значении 0,63 д.е., удельное сцепление 30 кПа; угол внутреннего трения 23°; модуль деформации 17,6 МПа.

*Скальные грунты*: представлены глинистыми сланцами (ИГЭ-5) малопрочными, сильновыветрелыми, сильнотрещиноватыми, неразмягчаемыми. Они залегают в основании разреза, с поверхности перекрыты значительной мощностью аллювиальных и элювиальных отложений. Плотность грунта естественного сложения изменяется от 2,08 до 2,82 г/см<sup>3</sup>, при среднем значении 2,31 г/см<sup>3</sup>, предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии колеблется от 5,2 до 14,8 МПа, при среднем значении 9,9 МПа, коэффициент выветрелости изменяется от 0,48 до 0,79, при среднем значении 0,69 [6].

#### Лазерное сканирование объекта

Одним из инновационных методов контроля деформаций зданий и сооружений является метод наземного лазерного сканирования. Данный вид съемки является трехмерным отображением реального положения объекта в момент осуществления съемочных работ, что позволяет решать следующие прикладные задачи: определение большинства геометрических характеристик технологических элементов и конструкций (расстояний, размеров, высот, объемов и т. п.); выполнение профилей, разрезов, сечений; различных планов объекта; проведение проектно-изыскательских ра-



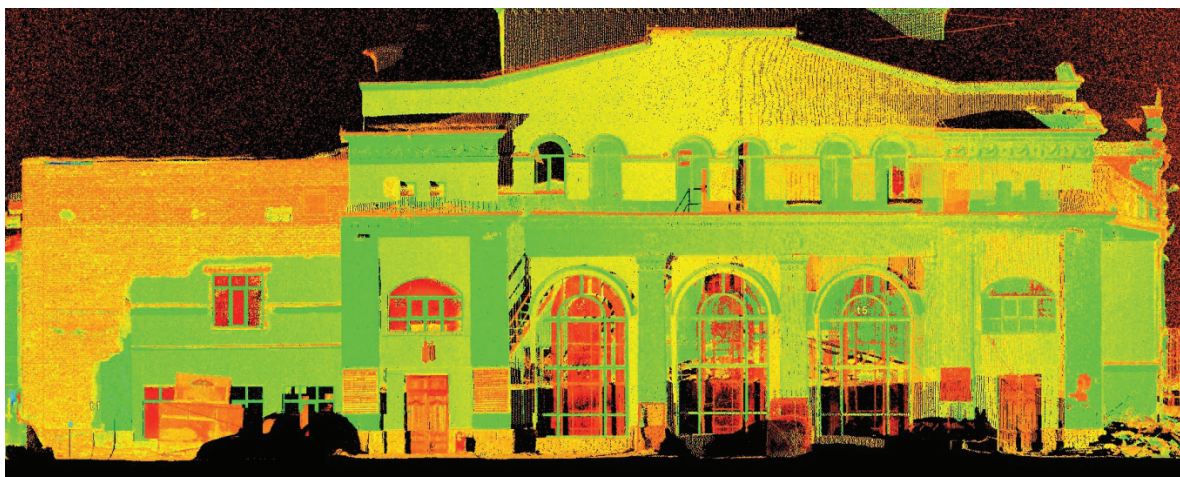


Рис. 5. Исходные данные в виде облака точек

Fig. 5. Original data in the form of a point cloud

бот; мониторинг технологического оборудования и состояния объектов; анализ и прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций [8–16].

«Центром лазерных технологий» ТПУ был проведен комплекс работ по съемке объекта в 2012 и 2017 гг. Целью работы являлось получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций. Наземное лазерное сканирование объекта проводилось Leica Scanstation S10. Данный сканер позволяет снимать до 50 тысяч точек в секунду на расстоянии до 300 м с максимальной погрешностью до 2 мм на 50 м.

Сканирование здания проводилось с семи станций, данные с которых сшивались в единое облако точек в программном комплексе Cyclone. Взаимное перекрытие облаков точек позволило с высокой точностью сшить данные сканирования. Также на каждой точке стояния лазерного сканера проводилась фотофиксация для дальнейшего создания сферических панорам, а также «раскрашивания» облака точек в реальные цвета.

После создания единого облака точек объекта выбиралась условная «нулевая» точка отсчета координат (0, 0, 0) для данного объекта. Условием определения направления осей точки отсчета являлось совпадение оси X и всех начальных («нуле-

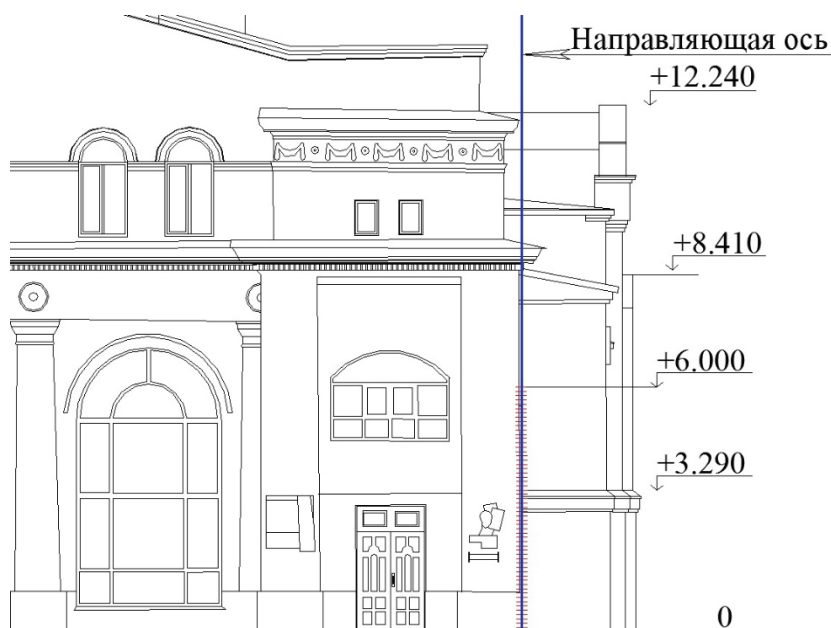


Рис. 6. Направляющая ось и схема точек

Fig. 6. Guide axis and points

вых») пикетов направляющих осей, по которым велись наблюдения. Набор точек направляющей оси проводился через 10 см на высоту 6 м в результате построения секущей плоскости, перпендикулярной направлению оси. Полученный набор точек экспортировался в программу MS Excel для построения графиков геометрических параметров направляющей оси стены.

Выполнение деформационного мониторинга сооружения при помощи наземного лазерного скани-

рования позволяет выявить деформации по заданным плоскостям, что недоступно для традиционных методов наблюдения. Путем сравнения отсканированной модели здания с проектными или условно эталонными плоскостями можно получить отклонения каждой внешней стены или здания в целом от исходной формы.

В данном исследовании для оценки деформаций здания был применен метод проекций стен на вертикальные плоскости. В программном ком-

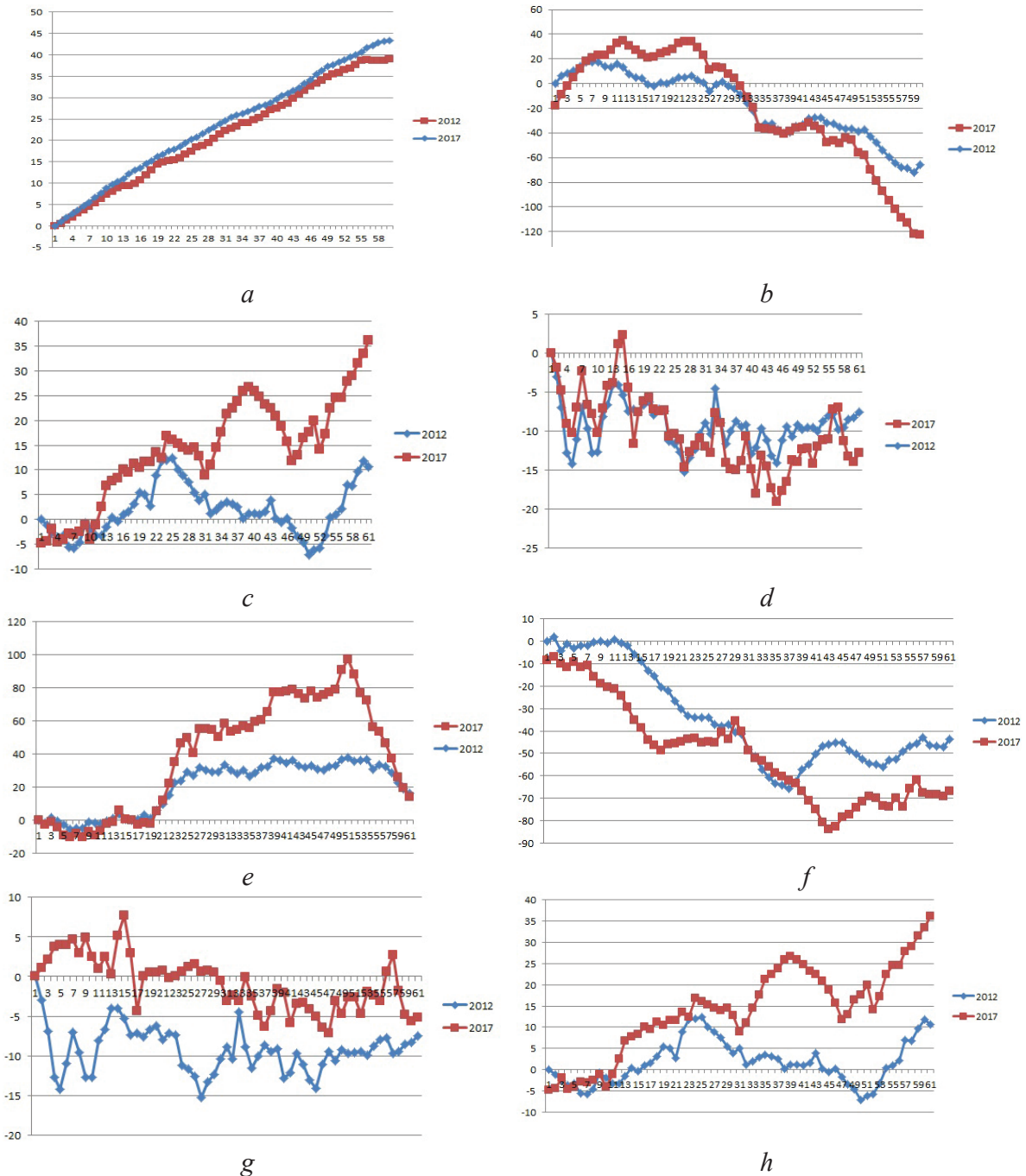


Рис. 7. Отклонения в плане и по вертикали углов: I (a и b); II (c и d); III (e и f); IV (g и h)

Fig. 7. Plan and vertical deviations of the angles: I (a, b); II (c, d); III (e, f); IV (g, h)

плексе Суслоне с помощью компьютерного моделирования в облако точек здания по четырем углам были вписаны условные направляющие, по которым определялись отклонения углов здания в 2012 и 2017 гг. (Е.А. Епифанова, 2017).

На графиках отчетливо видно два вида деформаций: смещение стен здания относительно друг друга, кроме этого каждая стена обладает собственной кривизной. Максимальные отклонения от вертикали наблюдаются в углах: I – 72 мм и III – 84 мм, в частности, за последние 5 лет 40 и 37 мм соответственно.

На основе трехмерной модели построены обмерочные чертежи здания с нанесением размеров и дефектов конструкций (рис. 9).

С целью оценить вклад грунтовых условий в деформации наземной части конструкции выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в ноябре 2017 г.

#### Анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов

В данном исследовании использован программный комплекс PLAXIS (2006). PLAXIS – комплекс, разработанный нидерландскими геотехниками R. de Borst, P.A. Vermeer (1984), успешно показал себя при решении многих геотехнических задач [17].

Грунтовой массив (длиной 70 м, мощностью 25 м) представлен в виде 2D – модели на рис. 10. После построения геометрической модели и задания свойств грунта PLAXIS автоматически сгенерирована сетка конечных элементов из 986 неправильных треугольных 15-узловых элементов. При расчете конечного элемента смещения рассчитываются по узлам, напряжения – в 11832 интегральных точках Гаусса (или точках напряжения). Вертикальная нагрузка от веса наземной части здания принята 90 кН/м/м.

Для материала фундаментов использовалась упругая модель (PLAXIS). Были использованы

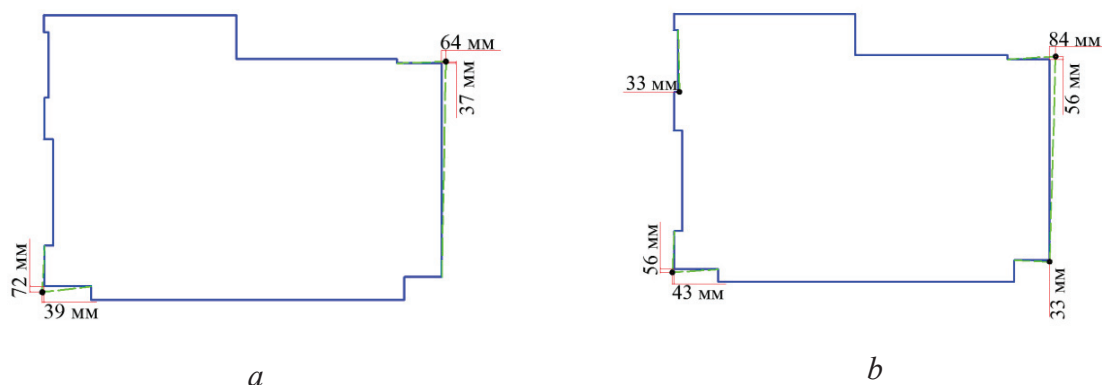


Рис. 8. Отклонения углов здания от вертикали: а) 2012 г., б) 2017 г.

Fig. 8. Deviations of the building angles from the vertical: a) 2012, b) 2017



Рис. 9. Трещины фасадов: главного: а) 2012 г.; б) 2017 г.; северного: с) 2012 г.; д) 2017 г.

Fig. 9. Cracks in the main elevation: a) 2012, b) 2017; and north elevation of the building: c) 2012; d) 2017



следующие параметры: удельный вес –  $25 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0,25. Для оценки поведения минеральных грунтов использована *упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model (PLAXIS)* [17]. Модель учитывает несовпадение модуля упругости ветвей разгрузки и повторного нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях. Модель точно описывает поведение грунта при его экскавации, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жесткости, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов [18, 19].

Оценка деформаций ползучести органоминерального грунта (встреченного в 1966, 1988 гг. в скважинах 10, 11, 8867 на глубине порядка 3–5 м, не изученного в отношении его физико-механических свойств) проводилась с использованием *Soft Soil Creep Model* [17, 20]. Результаты численного моделирования и лабораторных испытаний [21, 22] показали, что модель *Soft Soil Creep* достаточно точно моделирует процессы фильтрационной и вторичной консолидации.

Здание моделировалось жесткой плитой, опертой на межузловые анкеры. Удельный вес плиты представлял собой нагрузку от целого здания с нормальной жесткостью  $60 \text{ МН/м}$ , изгибной жесткостью  $5 \text{ МНм}^2/\text{м}$ . Данные по материалам фундаментов присвоены межузловым анкерам. Механические свойства анкеров следующие: нормальная жесткость  $20 \text{ МН}$ , максимальные усилия при сжатии/растяжении  $1 \cdot 10^{15} \text{ кН}$ , шаг расстановки анкеров 1 м. При задании начальных условий сге-

нерировано давление воды и начальные напряжения.

Расчеты заключались в определении вертикальных и горизонтальных перемещений грунтового основания от массы надфундаментной части. Моделирование процесса нагружения опоры осуществлялось с помощью опции расчета *Staged construction*. Эта опция позволяет активировать или деактивировать вес, жесткость и прочность выбранных компонентов конечно-элементной модели. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании.

### Результаты исследований и их обсуждение

Деформации наземной части здания являются неравномерными, поэтому недопустимо связывать их только с уплотнением грунтов основания. Кроме того, деформации продолжаются и после выполнения капитального ремонта здания 2012 г., когда трещины и деформации были спрятаны за косметическим слоем, а к настоящему времени раскрылись вновь.

Неравномерность деформаций, на наш взгляд, можно объяснить тремя факторами. Во-первых, ключевую роль в неравномерности осадок здания играет геоморфологические особенности участка. Совместное рассмотрение ориентировки здания и деформаций, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствует о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали, параллельно направлению бровки первой надпойменной террасы, вдоль реки Томь. Вероятно, такое расположение можно объяснить суффозионными и эрозионными процессами внутри грунтового массива при изме-

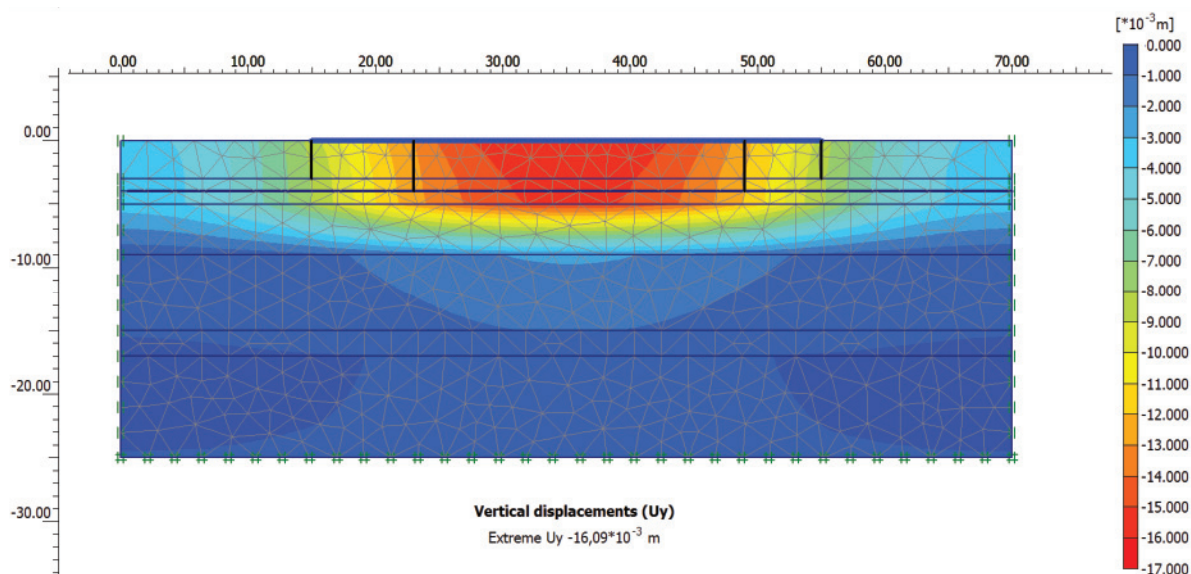


Рис. 10. Сетка конечных элементов

Fig. 10. Finite element mesh

нении уровней подземных и поверхностных вод в р. Томи и Ушайки.

Во-вторых, неравномерность деформаций, и это подтвердило моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива, связана с разной глубиной опирания основного здания и пристроек. По результатам лазерного сканирования объекта в 2012 и 2017 гг. установлено, что сгущение деформаций наблюдается в зоне сочленения основного здания и пристроек с западной и восточной сторон здания. Максимальные расчетные значения вертикальных перемещений грунтового массива составили 12,71 мм, горизонтальных – 1,72 мм. Расчетные значения вертикальных перемещений грунтового массива основного здания без пристроек составили 11,49 мм, горизонтальных – 1,71 мм. Поэтому концентрация деформаций в зоне сочленения пристроек и основного здания связана с пристройками, разной глубиной заложения их фундаментов.

В-третьих, продолжающиеся во времени деформации, вероятно, связаны с ползучестью органоминеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых тремя скважинами в непосредственной близости от здания. Моделирование ползучести грунта проводилось заданием дополнительных параметров для слоя, залегающего на глубине 3...5 м (модифицированный коэффициент компрессии  $\lambda^*=0,105$ , модифицированный коэффициент набухания  $\kappa^*=0,015$ , модифицированный коэффициент ползучести  $\mu^*=0,004$ ), собранных по литературным источникам из-за отсутствия данных по геологии участка в сфере взаимодействия. Приращение вертикальных и горизонтальных перемещений с учетом ползучести органоминерального грунта составили соответственно +3,38 и +0,17 мм в год.

### Выводы

Сохранение исторических объектов является сложной задачей для инженеров, т. к. часто отсутствуют исходные данные по геологии, проектным решениям, имеются ограничения при отборе образцов строительных материалов и грунтов для более точного определения их физико-механических свойств. Кроме того, анализ литературы по данной тематике [23–27] показывает, что как в нашей стране, так и за рубежом в настоящее время базис инженерно-геологических исследований исторических объектов только формируется в области теории, методов, нормативно-правового обеспечения этой деятельности.

Представлены две основные темы, имеющие интерес для данного исследования: (1) значимость методов лазерного сканирования для получения правильных данных по деформациям конструкции и (2) влияние геологических факторов на размещение деформаций в наземной части сооружения.

Применение наземных лазерно-сканирующих систем дало возможность произвести тотальную съемку объекта с высокой степенью плотности съемочных точек, построить векторные обмерные чертежи, точно определить деформации наземной конструкции. Совместное рассмотрение геологического разреза и систем трещин, полученных при помощи наземного лазерного сканирования в 2012 и 2017 гг., свидетельствует о том, что наземная конструкция деформируется по диагонали, параллельно направлению бровки первой надпойменной террасы, вдоль реки Томь. Трехмерная модель позволила определить направление максимальных деформаций здания, что затруднительно при обычной съемке объекта.

Разработана цифровая модель грунтового основания. Поведение грунтового массива смоделировано с помощью двух моделей: упругопластической модели с изотропным упрочнением *PLAXIS Hardening Soil* и *Soft Soil Creep Model*. Рассчитаны деформации грунтового основания. Выполнено сравнение результатов моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива с пространственно-координатным положением конструкций, установленным при лазерном сканировании. Грубая (при отсутствии характеристик геологического разреза сферы взаимодействия) оценка вклада в деформации грунтовых условий позволила установить, что они составляют треть от наблюдаемых. Концентрация трещин связана с пристройками с западной и восточной сторон здания. Деформации в зоне сочленения разновременных построек максимальны, кроме того, пристройки опираются на фундамент с меньшей глубиной заложения. Продолжающиеся во времени деформации, вероятно, связаны с ползучестью органоминеральных грунтов мощностью до 2 м, вскрытых скважинами в непосредственной близости от здания.

Показано преимущество комплексирования методов по оценке геометрии объекта и МКЭ для описания напряженно-деформированного состояния объекта. Полноценное обследование грунтового основания перед реконструкцией позволило бы избежать развития трещин после капитального ремонта сооружения 2012 г. Результаты указывают на важность рассмотрения триады: наземная конструкция – фундамент – основание, как единой системы. Предложенный подход обнаружения геометрических дефектов при помощи наземного лазерного сканирования и применение полученных данных в расчетной модели может быть использован при реставрации других исторических объектов.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности (средства ВИУ).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкин Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры. – СПб.: ПИ «Георекострукция», 2013. – 333 с.
2. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 1–47.
3. Ольховатенко В.Е., Лазарев В.М., Филимонова И.С. Геологические проблемы застройки территории г. Томска и мероприятия по её инженерной защите // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 1. – С. 141–150.
4. Бойко В.П. Купечество Западной Сибири в конце XVIII–XIX в. Очерки социальной, отраслевой и ментальной истории: монография / под. ред. В.П. Зиновьева. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. – 308 с.
5. Geotechnical properties of gullying in Tomsk Oblast / A.V. Leonova, K.M. Lomakina, S.A. Dmitrieva, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
6. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям: «Защита территорий г. Томска на правом берегу р. Томи от коммунального моста до устья р. Ушайки от негативного воздействия вод», в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов Томской области в 2013–2020 годах». – Томск: Томгипротранс, 2015. – Ч. 1. – Т. 2. – 100 с.
7. Строкова Л.А. Инженерно-геологическое районирование территории Томского Приобья по степени устойчивости геологической среды к техногенной нагрузке: дис... канд. наук. – Томск, 1997. – 200 с.
8. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
9. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys / D.D. Lichti, J. Franke, W. Cannel, K.D. Wheeler // J. Spat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 1. – P. 75–89.
10. Рылский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. – 2014. – № 8. – С. 38–48.
11. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
12. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England / M. Gallay, Ch.D. Lloyd, J. McKinley, L. Barry // Comput. and Geosci. – 2013. – V. 51. – P. 216–227.
13. Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
14. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidalizarandi, X. Xu, I.I. Neumann // Composite Structures. – 2016. – V. 149. – P. 93–105.
15. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring / R. Vežočník, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
16. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля / А.Н. Яковлев, Е.В. Токмаков, О.В. Павлов, В.Г. Ли, А.Н. Искрин, Т.Г. Коржнева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – Ч. 2. – С. 72–75.
17. Plaxis. Material Models Manual. – Delft: TU Delft, 2016. – 216 p.
18. 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. – № 43. – 6 p.
19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
20. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that account for creep // Beyond 2000 in computational geotechnics. – Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema, 1999. – P. 249–261.
21. Офрихтер В.Г., Офрихтер Я.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния твердых бытовых отходов с использованием модели слабого грунта // Вестник МГСУ. – 2014. – № 9. – С. 82–92.
22. Васенин В.А., Астафьева Е.Д. Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – № 1. – С. 1–21.
23. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – V. 63 (2). – P. 169–180.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring // IEEE Sensor. – 2016. – V. 7. – P. 2100–2104.
25. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings / G. Vacca, F. Mistretta, F. Stochino, A. Dessi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – Iss. B5. – P. 453–460.
26. Sternberg H. Deformation measurements at historical buildings with terrestrial laserscanners // IAPRS. – Dresden 25–27 September 2006. – V. 36. – P. 5. – P. 303–308.
27. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure // Natural hazards and Earth System Sciences. – 2015. – V. 15. – P. 1051–1059.

Поступила 18.12.2017 г.

## Информация об авторах

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

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



UDC 624.131

## EVALUATION OF DEFORMATION OF THE HISTORIC BUILDING IN TOMSK BY THE INTEGRATED APPROACH BASED ON TERRESTRIAL LASER SCANNER AND FINITE ELEMENT MODELING

Ekaterina A. Epifanova<sup>1</sup>,

epifanovaea@tpu.ru

Lyudmila A. Strokova<sup>1</sup>,

sla@tpu.ru

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

*The topic is relevant due to the necessity to improve approaches to estimation and prediction of deformations of historical constructions. The article deals with the study of engineering-geological conditions of the area during reconstruction of the building. It is necessary to introduce new technologies, such as laser scanning technology for construction of an accurate three-dimensional model of the object, finite element method for prediction of soil behaviour.*

**This study aims** to assess the effects of soil settlement on a structure's stress-strain state and the value of laser scanning techniques on structure analysis in obtaining correct data of deformation.

**Object.** The interaction of soil, foundations and structure of the Tomsk Youth Theatre or «Teatr Yunogo zritelya» is considered in conditions of dense development on the territory of Tomsk city.

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

**The results.** The authors have estimated the engineering geological conditions of a research site and developed a digital design model. The forecast of stress-strain state of the soils in reconstruction of the building is made. The soil profile and general crack formation together with terrestrial laser scanning measurement indicate that the structure is deformed diagonally along the river Tom. The concentration of cracks is associated with the western and eastern annexes to the building, which are supported by strip foundations lying at lower depth than the main building. The continued deformations are probably associated with creep of soft organic soils with a thickness of up to two meters.

### Key words:

Soil, terrestrial laser scanning (TLS), modeling, deformation, mechanical behavior, stress-strain state, finite element model (FEM), cultural heritage.

*The research was carried out within the Competitiveness enhancement Program at National Research Tomsk Polytechnic University (VIU fund).*

### REFERENCES

1. Pashkin E.M. *Inzhenerno-geologicheskaya diagnostika deformatsy pamyatnikov arkhitektury* [Engineering-geological diagnostics of deformations of architectural monuments]. St-Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2013. 333 p.
2. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Features of engineering-geological conditions of Saint-Petersburg city. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 2011, vol. 1, pp. 1–47. In Rus.
3. Olkhovatenko V.E., Lazarev V.M., Filimonova I.S. Geoenvironmental problems of building on Tomsk territory and actions for its engineering protection. *Vestnik of TSUAB*, 2012, no. 1, pp. 141–150. In Rus.
4. Boyko V.P. *Kupechestvo Zapadnoy Sibiri v kontse XVIII–XIX v. Ocherki sotsialnoy, otraslevooy i mentalnoy istorii* [Merchants of Western Siberia in the late XVIII–XIX century: essays on the social, industrial and mental history]. Tomsk, Tomsk State Architectural Building University Publ. house, 2009. 308 p.
5. Leonova A.V., Lomakina K.M., Dmitrieva S.A., Baranova A.V. Geotechnical properties of gullyng in Tomsk Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
6. *Tekhnicheskyy otchet po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam: Zashchita territoriy g. Tomsk na pravom beregu r. Tomi ot kommunalnogo mosta do ustya r. Ushayki ot negativnogo vozdeystviya vod, v ramkakh gosudarstvennoy programmy «Vosproizvodstvo i ispolzovanie prirodnykh resursov Tomskoy oblasti v 2013–2020 godakh»* [Technical report on engineering-geological surveys: Protection of the territories of Tomsk on the right bank of the river Tom from the municipal bridge to the mouth of the river Ushayka from adverse impact of waters, in the framework of the state program «Reproduction and use of natural resources of Tomsk region in 2013–2020 years»]. Tomsk, Tomgiprotrans Publ., 2015. Vol. 1, B. 2, 100 p.
7. Strokova L.A. *Inzhenerno-geologicheskoe rayonirovanie territorii Tomskogo Priobya po stepeni ustoychivosti geologicheskoy sredy k tekhnogennoy nagruzke*. Dis. Kand. nauk [Engineering-geological zoning of territory of the Tomsk Ob region on the degree of stability of the geological environment to anthropogenic load. Cand. Diss.]. Tomsk, 1997. 200 p.
8. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.



9. Lichti D.D., Franke J., Cannel W., Wheeler K.D. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *J. Spat. Sci.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 75–89.
10. Rylsky I.A., Malevannaya M.S. Nazemnye lazernye metody – novye podkhody k informatsionnomu obespecheniyu geograficheskikh issledovaniy [Terrestrial laser methods – new approaches to information support of geographical research]. *Geodeziya i kartografiya*, 2014, vol. 8, pp. 38–48.
11. Latypov A., Zharkova N., Nuriyev I. Landslide hazard assessment in city under construction Innopolis (Russia) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, vol. 33, 6 p.
12. Gallay M., Lloyd Ch.D., McKinley J., Barry L. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England. *Comput. and Geosci.*, 2013, vol. 51, pp. 216–227.
13. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D.V. General approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2013, no. 1, pp. 36–42. In Rus.
14. Yang H., Omidiazarandi M., Xu X., Neumann I.I. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.
15. Vežočník R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
16. Yakovlev A.N., Tokmakov E.V., Pavlov O.V., Li V.G., Iskrin A.N., Korzhneva T.G. Application of terrestrial laser scanning and three-dimensional information modeling for non-destructive testing. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12 (2), pp. 72–75. In Rus.
17. *Plaxis. Material Models Manual*. Delft, TU Delft, 2016. 216 p.
18. 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, vol. 43, 6 p.
19. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.
20. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that account for creep. *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema, 1999. pp. 249–261.
21. Ofrikhter V.G., Ofrikhter Ya.V. Prediction of stress-strain state of municipal solid waste with application of soft soil creep model. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2014, no. 9, pp. 82–92. In Rus.
22. Vasenin V.A., Astafyeva E.D. Accounting rheological properties of soils in calculation of building sediment. *J. Construction of Unique Buildings and Structures*, 2012, no. 1, pp. 1–21. In Rus.
23. Lichti D.D. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, vol. 63, no. 2, 169–180.
24. Yang H., Xu X., Neumann I. Laser scanning-based updating of a finite element model for structural health monitoring. *IEEE Sensor*, 2016, no. 7, pp. 2100–2104.
25. Vacca G., Mistretta F., Stochino, F., Dessi A. Terrestrial laser scanner for monitoring the deformations and the damages of buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, vol. 41, Iss. B5, pp. 453–460.
26. Sternberg H. Deformation measurements at historical buildings with terrestrial laserscanners. *IAPRS. Dresden 25–27 September 2006*, Vol. 36, P. 5, pp. 303–308.
27. Yardim Y., Mustafaraj E. Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure. *Natural hazards and Earth System Sciences*, 2015, vol. 15, pp. 1051–1059.

Received: 18 December 2017.

#### Information about the authors

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

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

УДК 662.35

## МЕХАНИЧЕСКОЕ СКРЕПЛЕНИЕ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРПУСОМ

Половникова Надежда Викторовна<sup>1</sup>,  
nadiapol@mail.ru

Громов Александр Михайлович<sup>1</sup>,  
gam-gromov@yandex.ru

Теплова Ирина Игоревна<sup>2</sup>,  
i.i.teplova@mail.ru

<sup>1</sup> АО «Федеральный научно-производственный центр "Алтай"»,  
Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1Б.

<sup>2</sup> Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета  
им. И.И. Ползунова,  
Россия, 659305, г. Бийск, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27.

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности добычи нефти и требованиями высокой прочности соединения на границе скрепления твердого топлива с внутренней поверхностью корпуса. Твердотопливные газогенерирующие устройства широко используются при добыче нефти для поддержания внутрипластового давления и повышения нефтедобычи скважин, особенно при добыче высоковязких видов. При этом работа газогенерирующих твердых топлив определяет эффективность добычи нефти.

**Цель работы:** создание способа скрепления твердого топлива с корпусом газогенератора, позволяющего расширить эксплуатационные возможности газогенератора, повысить технологичность изготовления за счет создания условий, обеспечивающих высокую прочность на отрыв между теплозащитным покрытием и топливом. При этом топливо должно быть скреплено с теплозащитным покрытием только механическим путем, без дополнительных конструктивных элементов, например, защитно-крепящего слоя и крепящего состава.

**Методы исследования:** определение прочности скрепления топлива с теплозащитным покрытием методом нормального отрыва, наблюдение за горением (визуализация).

**Результаты.** Выбрана форма профильных выступов на поверхности теплозащитного покрытия, в виде линейных полугантелей, обращенных внутрь заряда и выполненных из материала, химически совместимого с топливом. Благодаря профильным выступам обеспечивается механическое скрепление теплозащитного покрытия с топливным зарядом. В лабораторных и производственных условиях была проверена принципиальная работоспособность предложенной схемы крепления. Для этого были разработаны пресс-формы и изготовлены образцы профильного теплозащитного покрытия. Экспериментально проведена оптимизация размеров профилей. Испытания на нормальный отрыв показали, что отслоения твердого топлива от профилей теплозащитного покрытия не происходит и прочность скрепления с профильным теплозащитным покрытием находится на уровне условной прочности твердого топлива. Таким образом, подтверждена работоспособность предложенного способа крепления.

### Ключевые слова:

Адгезионная прочность, твердое топливо (ТТ), газогенераторный двигатель, теплозащитное покрытие, способ скрепления ТТ с корпусом, защитно-крепящий слой, крепящий состав, фронт горения, добыча нефти.

### Введение

В газогенерирующих устройствах при добыче нефти применяется твердое топливо для создания давления в нефтеносном пласте для повышения производительности скважин [1]. Одним из условий создания таких устройств является обеспечение необходимой прочности адгезионных соединений на границе составных элементов [2–9] (рис. 1): корпус – теплозащитное покрытие (ТЗП) – защитно-крепящий слой (ЗКС) – крепящий состав (КС) – твердое топливо (ТТ).

В крупногабаритных газогенераторах ТЗП защищает корпус от воздействия высокотемпературного газового потока и представляет собой эластичное покрытие на основе каучуков [10].

Для обеспечения прочного скрепления ТТ с ТЗП использовался ЗКС, представляющий собой резину, сдублированную с объемной капроновой тканью (ТКТЭ).

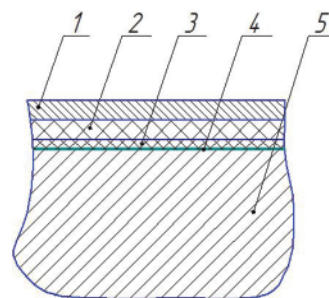


Рис. 1. Корпус газогенерирующего устройства в разрезе: 1 – корпус; 2 – теплозащитное покрытие; 3 – защитно-крепящий слой с капроновой тканью; 4 – крепящий состав; 5 – твердое топливо

Fig. 1. Engine body in section: 1 is the engine housing; 2 is the thermal-protective coating; 3 is the protective-fastening layer with a cloth of technical kapron elastic; 4 is the adhesive composition; 5 is the solid propellant

В качестве КС применяли жидкую клеевую композицию [11], которую наносили на ЗКС непосредственно перед формованием топливной массы [12, 13].

Кроме этого, для обеспечения прочного скрепления ТТ с корпусом необходимо предотвратить миграцию пластификаторов из топлива в КС и ЗКС. Этот процесс приводит к образованию в топливной переходной зоны с ухудшенными механическими характеристиками [14–20].

Существуют конструкции зарядов, где ТЗП выполняет также роль скрепляющего элемента с зарядом [21]. Подобная конструкция заряда исключает необходимость использования клея для скрепления слоя, обладающего термозащитной способностью (ТЗП), с корпусом за счет использования материала, представляющего собой каландрованный листовой материал (резиновая смесь), которым выкладывается внутренняя поверхность корпуса с последующей вулканизацией резиновой смеси при повышенных температурах (140...170 °С) и давлении (0,49...1,47 МПа) с одновременной приклейкой его к корпусу.

Недостатком такого заряда является необходимость введения в состав ТЗП, который имеет отличную от топливного заряда полимерную основу, дополнительного компонента для придания ТЗП приемлемой адгезионной способности к топливному заряду, что усложняет процесс получения ТЗП с такими функциями.

Были проведены поисковые работы по созданию бесклевого способа скрепления зарядов ТТ с корпусом двигателя, позволяющего расширить эксплуатационные возможности, повысить технологичность изготовления за счет создания условий, обеспечивающих высокую прочность на отрыв между ТЗП и топливом при достаточности использования только механического скрепления их между собой.

Известно предложение ученых США по бесклеевому скреплению топлива с корпусом [22]. В их случае скрепление обеспечивается точечными выступами различной формы на поверхности ТЗП. Одновременно предусмотрены мероприятия по дополнению механической связи применением адгезионного материала, нанесенного на поверхность ТЗП и поверхность выступов. Необходимость введения адгезионного слоя, выполнение выступов разной высоты, выполнение в них отверстий существенно усложняют технологию изготовления заряда.

#### Методики эксперимента

Достижение поставленной цели предлагается путем изготовления ТЗП с линейными профильными выступами [23, 24]. Схема скрепления заряда ТТ с корпусом газогенератора с помощью профильного ТЗП представлена на рис. 2.

Профильное ТЗП изготавливалось следующим образом. Металлические профилированные вкладыши закладывались в пресс-форму, на них накладывался не вулканизированный материал ТЗП, кото-

рый поддавливался и вулканизовался в пресс-форме с обогреваемыми плитами. Затем вкладыши последовательно извлекались.

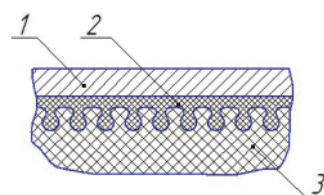


Рис. 2. Схема скрепления заряда твердого топлива с корпусом газогенератора: 1 – корпус; 2 – профильное теплозащитное покрытие; 3 – твердое топливо

Fig. 2. Scheme of fastening a solid propellant charge to the engine casing: 1 is the rocket engine body; 2 is the profile thermal-protective coating; 3 is the solid propellant

Размеры элементов профильных выступов (рис. 3) обусловлены условиями равнопрочности топлива в сечениях  $l$  и  $h$ :

$$L=l+D/2, h \geq l/2.$$

Наименьший размер профильных выступов определяется макрооднородностью ТТ. Для используемых ТТ он составляет  $D \approx 3...5$  мм. Оптимальное соотношение параметров  $L/D$  подобрано экспериментально и составляет  $L/D = 1,7...2$ .

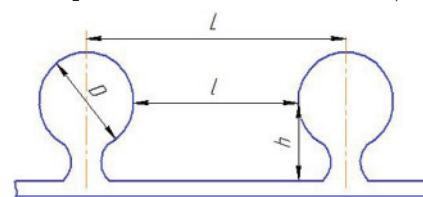


Рис. 3. Геометрические размеры профилей теплозащитного покрытия

Fig. 3. Geometrical dimensions of thermal-protective coating profiles

#### Результаты экспериментов

На первом этапе исследования в лабораторных условиях была проверена принципиальная работоспособность предложенной схемы крепления. Для этого были разработаны пресс-формы (рис. 4, а) и изготовлены образцы профильного ТЗП диаметром 115 мм.

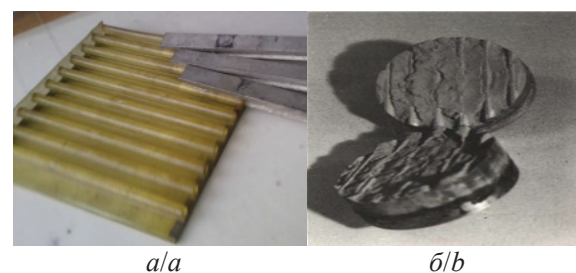


Рис. 4. Фотографии профильного теплозащитного покрытия (а) и образца скрепления диаметром 115 мм с инертным твердым топливом (б)

Fig. 4. Photos of profile thermal-protective coating (a) and bonding specimen 115 mm in diameter with inert solid fuel (b)

Эти испытания показали, что отслоения топлива от ТЗП не происходит. При растяжении образец разрушается по топливу (рис. 4, б).

На втором этапе для оптимизации размеров профилей в производственных условиях по действующей технологической документации были изготовлены и испытаны штатные образцы диаметром 25 мм. Профильное ТЗП на образцах имело различное соотношение  $L/D$  (рис. 5, а).

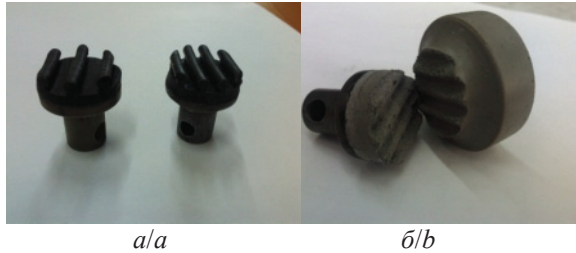


Рис. 5. Фотографии образцов-грибков с различным расстоянием между профилями (а) и разрушенного образца после испытания (б)

Fig. 5. Photos of samples-fungus with different distance between the profiles (a) and the destroyed specimen after the test (b)

Результаты испытаний представлены в таблице.

Таблица. Результаты испытаний образцов с разными профилями

Table. Test results for samples with different profiles

Показатель Index	Номер образца/Specimen number	
	Образцы с 3 профилями Specimen with 3 sections	Образцы с 4 профилями Specimen with 4 sections
$D$ , мм (mm)	3,5	3,5
$L$ , мм (mm)	8,6	6
$L/D$	2,45	1,71
Характер разрушения Fracture mode	По топливу By fuel	
$\sigma_{адг}$ , Мпа (MPa)	0,33±0,02	0,37±0,01
$\sigma$ , Мпа (MPa)	0,48±0,01	
$S/S_{эф}$	1,38	1,28
$\sigma_{эф}$ , Мпа (MPa)	0,45±0,02	0,47±0,01

Из таблицы видно, что разрушение образцов происходило по топливу без отслоения от профильного ТЗП (рис. 5, б).

Твердое топливо по краю образца не скреплялось с ТЗП (рис. 6), поэтому в расчет на прочность закладывалась только эффективная площадь образцов ( $S_{эф}$ ).

Полученные значения прочности скрепления ( $\sigma_{эф}$ ) оказались на уровне прочности топлива ( $\sigma$ ) в пределах разбросов.

Пассивный вес, создаваемый профилями ТЗП, компенсируется исключением пассивного веса КС и ЗКС с ТКГЭ, а также варьированием высоты выступов по зонам заряда [25]. Например, высота выступов в торцевых зонах варьируется в соответствии с уровнем отрывных напряжений, постепенно уменьшаясь в направлении цилиндрической части корпуса.

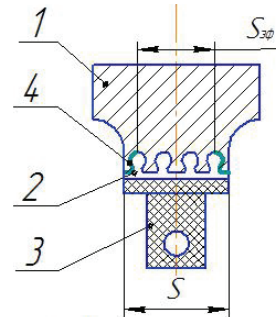


Рис. 6. Конструкция образца-грибка с бесклеевым креплением: 1 – твердое топливо; 2 – профильное теплозащитное покрытие; 3 – металлический грибок; 4 – поверхность теплозащитного покрытия, не воспринимающая нагрузку

Fig. 6. Sample-fungal construction with glue-free fastening: 1 is the solid propellant; 2 is the profile heat-shielding coating; 3 is the metallic fungus; 4 is the surface of the heat-shielding coating not absorbing the load

Разработанный способ скрепления позволяет сократить технологический цикл подготовки корпуса за счет устранения операций сушки корпуса, последующей перевозки, перегрузки, процесса нанесения КС. Бесклеевое крепление позволяет унифицировать способы скрепления различных газогенерирующих ТТ, используемых при добыче нефти, для поддержания внутрипластового давления, уменьшить процессы диффузии несвязанных жидких компонентов топлива в элементы корпуса, что дает возможность повысить сроки службы заряда за счет исключения вероятности отслоения ТТ от элементов корпуса.

#### Заключение

В лабораторных условиях экспериментально показана принципиальная работоспособность способа скрепления ТТ с корпусом газогенератора с применением профильного ТЗП. На образцах, изготовленных в производственных условиях, показано, что прочность скрепления с использованием профильного ТЗП (0,47 МПа) находится на уровне прочности топлива (0,48 МПа). Бесклеевой способ скрепления позволит гарантированно обеспечить прочное крепление газогенерирующих ТТ с корпусом генератора, а также надежность работы и стабильное поддержание внутрипластового давления при добыче высоковязких видов нефти.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков Б.П., Фролов К.В. Интенсификация и восстановление нефтяных скважин с помощью конденсированных систем. – М.: ЛНПО «Союз», 1993. – 59 с.
2. Устройство для стендовой отработки зарядов твердого топлива: пат. Рос. Федерация № 2566852; заявл. 24.06.2014; опубл. 21.10.2015, Бюл. № 30. – 7 с.
3. Шуров В.И. Технология и техника добычи нефти. – М.: Недра, 1983. – 510 с.
4. Review on the Test Method of Adhesive Failure in Solid Rocket Motor / L. Chen, L. Gui-e, J. Jinyong, G. Qiang, W. Shaoguang // Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference. – Chongqing, China, 2015. – P. 675–679.
5. Guangming T., Zhaoxian B., Xiaohong Z. Solid Propellant Charge Design. – China: National Defense Industry Press, 2013. – 158 p.
6. Способ изготовления прочноскрепленного с корпусом ракетного двигателя заряда смешанного ракетного твердого топлива: пат. Рос. Федерация № 2374213; заявл. 18.07.20084; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 13 с.
7. Davenas A. Solid Rocket Propulsion Technology. – Oxford: Pergamon Press, 1992. – 620 p.
8. Косточко А.В., Козбан Б.М. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства. Физико-химические свойства порохов и ракетных твердых топлив. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 400 с.
9. De Mores A. Increasing of adhesive bond strength at sector of bonding PLL-SPM grain // 41<sup>st</sup> International Annual Conference of ICT. – Karlsruhe, Germany, 2012. – P. 36–41.
10. Vesna Rodic. Case Bonded System for Composite Solid Propellants // Scientific Technical Review. – 2007. – № 3–4. – P. 77–81.
11. Пластификаторостойкий крепящий состав на основе олигодиеуретанэпоксидного каучука / О.И. Сидоров, Ю.М. Милехин, А.А. Матвеев, Т.П. Поисова, Н.В. Поторокина // Клеи. Герметики. Технологии. – 2013. – № 3. – С. 18–24.
12. Оптимизация режимов формирования адгезионной связи высокоэнергетического композиционного материала на основе бутадиев-нитрильного каучука с жесткой многослойной подложкой / Н.В. Половникова, А.Ю. Скуратов, П.И. Таронов, О.Г. Сабинская, А.В. Щемелинин // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2017. – № 1. – С. 37–40.
13. Жуков Б.П. Энергетические конденсированные системы. – М.: Изд-во «Янус-К», 2000. – 596 с.
14. Study of plasticizer diffusion in a solid rocket motor's bondline / J. Libardi, S.P. Ravagnani, A.M. Morais, A.R. Cardoso // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2009. – V. 1. – № 2. – P. 223–229.
15. Libardi J. Study of the Phenomenon of Solid Composite Propellant Plasticizers of Hydroxy Polybutadiene Used in Motors Rocket // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2010. – V. 20. – № 4. – P. 241–245.
16. Физико-механические процессы в изделиях из высокоэнергетических конденсированных материалов при длительной эксплуатации / А.С. Жарков, И.И. Анисимов, В.И. Марьяш, Б.А. Люкшин // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 4. – С. 93–106.
17. Работоспособность топливного элемента в зоне скрепления с корпусом энергетической установки. Ч. 1. Особенности механического проведения и оценки работоспособности топливного элемента / Е.А. Чащихин, И.И. Анисимов, В.И. Десятых, Б.А. Люкшин // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 6. – С. 115–123.
18. Ершова А.А., Ознобишин Б.В., Еременко П.П. Исследование напряженно-деформированного состояния системы «корпус–ТЭП–заряд» // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 21–30.
19. Migration kinetics and mechanisms of plasticizers, stabilizers at interfaces of NEPE propellant / H. Zhi-ping, N. Hai-ying, Z. Yuan-yuan, T. Li-min, Y. Hua-li, M. Xin-gang // Journal of Hazardous Materials. – 30 August 2012. – V. 229–230. – P. 251–257.
20. Feng-jun W., Song P., Xu-hui C. Study of microcosmic mechanics performance/structure of NERE propellant/liner bonded interface // Journal of solid rocket technology. – 2010. – № 1. – P. 81–85.
21. Заряд ракетного твердого топлива: пат. Рос. Федерация № 2216641; заявл. 09.01.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 9 с.
22. Mechanical bond between a solid rocket propellant composition, a substrate, and a method of effecting such a bond: pat. USA № 4649823; declared 31.07.1985; published 17.03.1987. – 5 p.
23. Скрепление заряда ракетного твердого топлива: пат. Рос. Федерация № 2542632; заявл. 02.07.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 8 с.
24. Бесклеевое скрепление зарядов СРТТ с корпусом двигателя / В.П. Ковалев, Н.В. Половникова, А.М. Громов, А.Ю. Скуратов, П.И. Таронов // НЕМs-2014: Тезисы X Международной конференции. – Бийск, 3–5 сентября 2014. – Бийск: Изд-во Алт ГТУ, 2014. – С. 105–107.
25. Скрепленный заряд ракетного твердого топлива: пат. Рос. Федерация № 2607196; заявл. 23.07.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 8 с.

Поступила 21.11.2017 г.

## Информация об авторах

**Половникова Н.В.**, ведущий инженер-технолог АО «Федеральный научно-производственный центр "Алтай"».

**Громов А.М.**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник – руководитель группы АО «Федеральный научно-производственный центр "Алтай"».

**Теплова И.И.**, студентка кафедры химической технологии энергонасыщенных материалов и изделий Бийского технологического института (филиала) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

UDC 662.35

**MECHANICAL BONDING OF SOLID PROPELLANT ELEMENTS WITH THE CASE****Nadezhda V. Polovnikova<sup>1</sup>,**

nadiapol@mail.ru

**Alexander M. Gromov<sup>1</sup>,**

gam-gromov@yandex.ru

**Irina I. Teplova<sup>2</sup>,**

i.i.teplova@mail.ru

<sup>1</sup> JSC «FR&PC "Altai"»,  
1B, Sotsialisticheskaya street, Biysk, 659322, Russia.<sup>2</sup> Biysk Technological Institute of I.I. Polzunov, Branch of Altai State Technical university,  
27, Trofimov street, Biysk, 659305, Russia.

The relevance of work is caused by the need to increase the efficiency of oil production and the requirements to high-strength joints in places of bonding solid propellant with inner surface of the case. Solid propellant gas-generating devices are widely used in oil production to maintain intra-layer pressure and increase oil production, especially at production of high-viscosity types. At the same time work gas-generating solid propellant defines the effectiveness of oil production.

**The main aim** of the study is to develop a method to bond solid propellant with a case of the gas generating engine that allows expanding operational functionality of solid-propellant engine, increasing manufacturability due to processing steps providing high pull strength between thermal-protective coating and solid propellant. At the same time solid propellant is to be bonded with thermal-protective coating only physically without any structural element e.g. protective liner coating and liner composition.

**The methods:** determination of bonding strength of solid propellant with pull-off method.

**The results.** Shaped lugs on the surface of thermal-protective coating were chosen to be linear semi-dumb-bells that are charge inward facing and made of a material that is chemically compatible with solid propellant. Due to the shaped lugs the mechanical bonding with the propulsion charge is provided. In vitro and under factory conditions the performance capability of the proposed bonding scheme was tested. Some press molds were developed and models of the shaped thermal-protective coating were manufactured. Optimization of the shape was performed during the experiment. Pull-off tests showed that solid propellant were detached from thermal-protective coating with profiles and bonding strength with the shaped thermal-protective coating was at a level of solid propellant nominal strength. So the performance capability of the proposed bonding way was confirmed.

**Key words:**

Adhesive strength, solid propellant (SP), gas generating engine, thermal-protective coating, way of bonding SP with a case, protective liner layer, liner composition, combustion front, oil production.

**REFERENCES**

- Zhukov B.P., Frolov K.V. *Intensifikatsiya i vosstsnovlenie neftyanykh skvazhin s pomoshchyu kondensirovannykh energeticheskikh sistem* [Intensification and restoration of oil wells with the help of condensed energy systems]. Moscow, Soyuz Publ., 1993. 59 p.
- Vogantov K.A. *Ustroystvo dlya stendovoy otrabotki zaryadov tverdogo topliva* [Device for bench testing of solid fuel charges]. Patent RF, no. 2566852, 2015.
- Shurov V.L. *Tekhnologiya i tekhnika dobyichi nefti* [Technology and technique of oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 510 p.
- Chen L. Review on the Test Method of Adhesive Failure in Solid Rocket Motor. *Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference*. Chongqing, China, 2015. pp. 675–679.
- Guangming T., Zhaoxian B., Xiaohong Z. *Solid Propellant Charge Design*. China, National Defense Industry Press, 2013. 158 p.
- Sidorov O.I., Poisova T.P., Khayrullin Z.Ya., Parshina E.I., Metelov A.I., Samoylenko A.F., Milekhin Yu.M., Merkulov V.M., Banzula Yu.B., Kapitonov A.V., Parfenova N.N. *Sposob izgotovleniya prochnoskrepennogo s korpusom raketnogo dvigatelya zaryada smesevogo raketnogo tverdogo topliva* [The method of manufacturing a charge of a mixed rocket solid fuel with a rocket engine body]. Patent RF, no. 2374213, 2009.
- Davenas A. *Solid Rocket Propulsion Technology*. Oxford, Pergamon Press, 1992. 620 p.
- Kostocho A.V., Kozban B.M. *Porokha, raketnye tverdye topliva i ikh svoystva. Fiziko-khimicheskie svoystva porokhov i raketnykh tverdykh topliv* [Powder, rocket solid fuels and their properties. Physico-chemical properties of propellants and rocket solid fuels]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 400 p.
- De Mores A. Increasing of adhesive bond strength at sector of bonding PLL-SPM grain. *41<sup>st</sup> International Annual Conference of ICT*. Karlsruhe, Germany, 2012. pp. 36–41.
- Vesna Rodic. Case Bonded System for Composite Solid Propellants. *Scientific Technical Review*, 2007, no. 3–4, pp. 77–81.
- Sidorov O.I., Milekhin Yu.M., Matveev A.A., Poisova T.P., Potorokina N.V. Plastifikatorostoykiy krepyashchy sostav na osnove oligodienuretaneпоксидного каучука [Plasticizer-resistant liner composition based on oligodieneurethaneepoxy caoutchouc]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 18–24.
- Polovnikova N.V., Skuratov A.Yu., Taronov P.I., Sabinskaya O.G., Chemelinin A.V. Optimizatsiya rezhimov formirovaniya adgezionnoy svyazi vysokoenergeticheskogo kompozitsionnogo materiala na osnove butadien-nitrilnogo kauchuka s zhestkoy mnogosloynnoy podlozhkoy [Formation mode optimization of adhesive bond of high-energy composite material based on butadiene-nitrile caoutchouc with hard multilayer stratum.]. *Boeprisy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy*, 2017, no. 1, pp. 37–40.

13. Zhukov B.P. *Energeticheskie kondensirovannye sistemy* [Energy condensed systems]. Moscow, Yanus-K Publ., 2000. 96 p.
14. Libardi J. Study of plasticizer diffusion in a solid rocket motor's bondline. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2009, vol. 1, no. 2, pp. 223–229.
15. Libardi J. Study of the Phenomenon of Solid Composite Propellant Plasticizers of Hydroxy Polybutadiene Used in Motors Rocket. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 241–245.
16. Zharkov A.S., Anisimov I.I., Maryash V.I., Lyukshin B.A. Physical and mechanical processes in products of high-energy condensed materials under long-term operation. *Physical Mesomechanics*, 2006, vol. 9, no. 4, pp. 93–106. In Rus.
17. Chashchikhin E.A., Anisimov I.I., Desyatykh V.I., Lyukshin B.A. Efficiency of a fuel cell at the sector of bonding with a power-plant case. P. 1. Features of mechanical carrying out and efficiency evaluation of a fuel cell. *Physical Mesomechanics*, 2008, vol. 11, no. 6, pp. 115–123. In Rus.
18. Ershova A.A., Oznobishin B.V., Eremenko P.P. Study of stress-strain state of the «case-TPC-grain» system. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2013, no. 35, pp. 21–30. In Rus.
19. Zhi-ping H., Hai-ying N., Yuan-yuan Z., Li-min T., Hua-li Y., Xin-gang M. Migration kinetics and mechanisms of plasticizers, stabilizers at interfaces of NEPE propellant. *Journal of Hazardous Materials*, 30 August 2012, vol. 229–230, pp. 251–257.
20. Feng-jun W., Song P., Xu-hui C. Study of microcosmic mechanics performance/structure of NERE propellant/liner bonded interface. *Journal of solid rocket technology*, 2010, no. 01, pp. 81–85.
21. Valeev N.S., Zvereva I.G., Amarantov G.N., Baranov G.N., Shamraev V.Ya., Kusakin Yu.N., Talalaev A.P., Solovyov A.F., Kuzmitsky G.E., Fedchenko N.N., Vronsky N.M., Makarov L.B., Bulashevich A.P., Ezhov G.P., Fokin A.S., Okhrimenko E.F., Kolesnikov V.I. *Zaryad raketnogo tverdogo topliva* [Solid propellant charge]. Patent RF, no. 221664, 2009.
22. Bell F.H. *Mechanical Bond Between a solid rocket propellant composition, a substrate, and a method of effecting such a bond*: Patent USA, no. 4649823, 1987.
23. Zharkov A.S., Dochilov N.I., Gromov A.M., Taronov I.P., Kazakov A.A., Kovalev V.P. *Skreplenie zaryada raketnogo tverdogo topliva* [Bonding of solid propellant charge]. Patent RF, no. 2542632, 2015.
24. Kovalev V.P., Polovnikova N.V., Gromov A.M., Skuratov A.Yu., Taronov P.I. *Beskleevoe skreplenie zaryadov SRTT s korpusom dvigatelya* [Direct bonding of SP charges with the engine case]. *NEMs-2014. Tezisy X Mezhdunarodnoy konferentsii* [Theses of the X International Conference]. Biysk, 3–5 September, 2014. Biysk, Alt GTU Press, 2014. pp. 105–107.
25. Zharkov A.S., Dochilov N.I., Taronov P.I., Kazakov A.A., Kovalev V.P., Mochalov S.V., Polovnikova N.V., Skuratov A.Yu. *Skreplenny zaryad raketnogo tverdogo topliva* [Bonded rocket solid fuel charge]. Patent RF, no. 2607196, 2017.

Received: 21 November 2017.

#### Information about the authors

**Nadezhda V. Polovnikova**, engineer, JSC «FR&PC "Altai"».

**Alexander M. Gromov**, Cand. Sc., senior researcher, JSC «FR&PC "Altai"».

**Irina I. Teplova**, student, Biysk Technological Institute of I.I. Polzunov, Branch of Altai State Technical university.

УДК 544.3

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Бычинский Валерий Алексеевич<sup>1</sup>,  
val@igc.irk.ru

Королева Ольга Николаевна<sup>2,3</sup>,  
olgankoroleva@gmail.com

Ощепкова Анастасия Владимировна<sup>1</sup>,  
oshepkova-anasta@mail.ru

Штенберг Михаил Владимирович<sup>2</sup>,  
shtenberg@mineralogy.ru

<sup>1</sup> Институт геохимии СО РАН,  
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

<sup>2</sup> Институт минералогии УрО РАН,  
Россия, 456317, г. Миасс, территория Ильменский заповедник.

<sup>3</sup> Южно-Уральский Государственный университет, филиал в г. Миасс,  
Россия, 456304, г. Миасс, ул. Калинина, 37.

**Актуальность.** Разработан способ расчета термодинамических свойств природных и искусственных минералов, являющийся эффективным дополнением трудоемких и высоко затратных экспериментальных исследований. Данный метод позволяет с достаточной точностью вычислить по химическому составу стехиометрические формулы, значения энтальпии, энергии Гиббса, энтропии и теплоемкости ранее неизученных соединений. Эти параметры необходимы для определения условий образования этих компонентов и возможных путей дальнейшего использования в технологических процессах.

**Цель исследования:** на примере щелочных силикатов и глинистых минералов сопоставить возможности и особенности применения методов расчета термодинамических свойств с помощью регрессионного анализа и минимизации свободной энергии; сравнить полученные значения с экспериментальными данными.

**Объектами** исследования являются щелочные силикаты лития, калия и натрия, а также природные смешанно-слоистые алюмосиликаты из Таганского месторождения и из кальдеры Узон (Камчатка).

**Методы исследования:** два основных метода для определения термодинамических свойств соединений: регрессионный анализ на основе классического аддитивного метода Неймана–Коппа и расчет с помощью минимизации сводной энергии с использованием модели идеального твердого раствора (программный комплекс «Селектор»).

**Результаты.** Проведен расчет термодинамических свойств с помощью регрессионного анализа. Показана хорошая сходимость экспериментальных данных, на основе литературных источников, и расчета значений энтальпии и энтропии образования для щелочных силикатов. Расчет термодинамических свойств методом минимизации свободной энергии и модели идеальных твердых растворов смешанно-слоистых алюмосиликатов позволил по химическому составу определить сводные стехиометрические формулы, энергию Гиббса, энтальпию образования и энтропию монтмориллонитов и хлоритов. Полученные значения по точности сопоставимы с результатами расплавной калориметрии растворения и справочными данными. Полученные результаты показали, что химический состав мономинеральной фракций не идеален. Поэтому если формула минерала известна заранее, то расчет термодинамических свойств методом минимизации термодинамических потенциалов удобнее выполнять по стехиометрической формуле, корректируя список минералов твердого раствора.

### Ключевые слова:

Щелочные силикаты, смешанно-слоистые алюмосиликаты, регрессионный анализ, физико-химическое моделирование, модель твердых растворов.

### Введение

Одним из наиболее эффективных способов описания физико-химических процессов, протекающих в сложных гетерогенных системах, является метод минимизации термодинамических потенциалов [1, 2]. Разработанные к настоящему времени алгоритмы минимизации позволяют исследовать сложные природные и технологические процессы. Однако широкое применение метода минимизации ограничено неполнотой экспериментальных и теоретиче-

ских данных о термодинамических свойствах индивидуальных веществ, поэтому наиболее важной проблемой является разработка методов расчета термодинамических свойств природных минералов и химических соединений, основанных на минимизации свободной энергии. Исходными данными служат: химический состав мономинеральной фракции, и/или стехиометрическая формула вещества, термодинамические свойства веществ аналогов, например расплавов или твердых растворов.



### Объекты исследования

Структуру силикатных расплавов, играющих важную роль в природных и технологических процессах, чаще всего изучают методами колебательной спектроскопии [3–11]. Вследствие трудоемкости проведения полномасштабного эксперимента и зачастую недоступности аналитического исследования расплавов *in situ*, анализ особенностей изменения структуры расплава, в зависимости от химического состава и температуры, целесообразно проводить методами физико-химического моделирования (ФХМ) [12–15]. Несмотря на весомые результаты, полученные в области изучения минеральных систем в широком интервале температур и давлений [1, 2, 16], методы ФХМ имеют ряд существенных ограничений, заключающихся главным образом в недостатке и несогласованности термодинамических свойств индивидуальных веществ.

Различия в способах обработки результатов калориметрии Na, K, Li привели к тому, что термодинамические свойства их силикатов в справочниках [17–19] существенно различаются, однако надежный критерий выбора достоверной величины не был разработан [20]. Исходные данные, на основе которых были сконструированы формуляры термодинамических свойств  $K_2SiO_3$  и  $K_2Si_2O_5$  в конденсированном состоянии, получены из [19]. В работе [17] опубликованы экспериментальные и расчетные термодинамические данные для  $Li_2SiO_3$ ,  $Li_2Si_2O_5$ ,  $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2Si_2O_5$ . Поскольку согласованной базы термодинамических данных, необходимых для создания корректной физико-химической модели силикатных расплавов, не существует, энергии Гиббса именно этих соединений были взяты в качестве исходных данных для разработки метода расчета термодинамических свойств [14, 21].

Состав и структура глинистых минералов содержат информацию о геологических и геохимических процессах. Однако детальное изучение кристаллохимических свойств глинистых минералов сдерживается определенными трудностями, связанными с их сложной структурой и большим числом изоморфных примесей [22]. Тем не менее, возможности предлагаемого способа расчета термодинамических свойств индивидуальных веществ по химическому составу были проверены на твердых растворах слоистых алюмосиликатов (монтмориллонитов и хлоритов). В данном случае следует учитывать, что общий химический состав мономинеральной фракции существенно отличается от состава стехиометрического минерала, поэтому расчеты как термодинамических свойств, так и не известной ранее стехиометрической формулы связаны с отдельной задачей – согласованием списка миналов твердого раствора, требующей однозначного решения.

### Методы исследования

Возможны два различных подхода к расчетам термодинамики сложных химических соединений. Первый применяется, когда имеются прямые ана-

логи или известна стехиометрия оцениваемых веществ. Второй – когда стехиометрия неизвестна и есть только набор потенциальных миналов, из которых данный минерал состоит. Таким образом, задача ставится как двухуровневая: вначале на основе модели твердого раствора оценивается формула минерала, а затем его термодинамические свойства.

Рассмотрим подробно первый подход. В критическом анализе данных по термодинамическим свойствам большое значение имеет оценка их погрешности, т. к. иногда авторы завышают точность проведенных измерений [20]. В настоящей работе были использованы данные из справочников [17–19], а также ряда других работ [23]. Для оценки термодинамических свойств соединений, не изученных экспериментально, использовался регрессионный анализ на основе классического аддитивного метода Неймана–Коппа:

$$F(A_k B_l) = kF(A) + lF(B), \quad (1)$$

где  $F$  – произвольный термодинамический или термохимический потенциал;  $A$  и  $B$  – структурные единицы (элементы, ионы, оксиды и т. д.), на которые могут быть разложены исследуемые вещества;  $k$  и  $l$  – количество структурных единиц.

Для определения термодинамических потенциалов простых структурных единиц в уравнении (1), составляется регрессионная матрица веществ с известными термодинамическими свойствами. Уравнение множественной регрессии, устанавливающее зависимость между известными величинами термодинамических (термохимических) потенциалов и структурой веществ, имеет вид:

$$y_i = \sum_{j=1}^m b_j x_{ij}, \quad (2)$$

где  $y_i$  –  $i$ -е зависимое значение известного потенциала (известная численная величина исследуемого термодинамического свойства  $i$ -го базового вещества);  $b_j$  – коэффициенты множественной регрессии;  $x_{ij}$  – независимые параметры известного потенциала (количество  $i$ -й структурной единицы);  $i=1, n$  – количество строк базовой матрицы (количество базовых веществ);  $j=1, m$  – количество столбцов матрицы (количество структурных единиц).

Единственное решение системы (2) не может быть выбрано на основании только математических критериев, таких как коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение и т. п. Необходимо введение дополнительных термодинамических ограничений, обусловленных свойствами базовых компонентов. В [20] показано, что для термодинамических потенциалов (например, стандартной энтропии) изоструктурных соединений величины  $b_j$  составляющих компонентов имеют ярко выраженную зависимость от молекулярной массы этих компонентов. Такая особенность позволяет выбрать единственное решение системы (2).

Для термохимических потенциалов (например, энтальпии образования из простых веществ) зави-

симось величины  $b_j$  от молекулярной массы структурных составляющих обычно не проявляется. Поскольку в качестве структурных единиц А и В нами выбраны оксид кремния и оксиды щелочных металлов, величину  $b_j$  можно представить в виде:

$$b_j = b_j(Str) + b_j(Ex), \quad (3)$$

где  $b_j(Str)$  – величина исследуемого термодинамического или термохимического потенциала структурной составляющей  $x_{ij}$  как индивидуального вещества (в соответствующем фазовом состоянии);  $b_j(Ex)$  – избыточная функция структурной составляющей  $x_{ij}$  при образовании соединения с термодинамическим или термохимическим потенциалом  $y_i$ .

Наши исследования закономерностей изменения энтальпии образования из простых веществ в рядах боратов, алюминатов, фторалюминатов, арсенатов щелочных металлов, а также алюминатов и арсенатов щелочноземельных металлов показали, что ярко выраженную зависимость от молекулярной массы однотипных структурных единиц имеют их избыточные функции. Таким образом, анализ (3) позволяет выбрать единственное решение (2) для термохимических потенциалов.

Поскольку согласование термодинамических величин следует выполнять на основе представительного количества изоструктурных веществ, расчеты проводились одновременно для силикатов калия, лития и натрия. Тогда система принимает вид:

$$y_i = b_1 x_{\text{SiO}_2} + b_2 x_{\text{Li}_2\text{O}} + b_3 x_{\text{Na}_2\text{O}} + b_4 x_{\text{K}_2\text{O}}. \quad (4)$$

В программном комплексе «Селектор» [1] для расчета фазового состава систем, температура плавления которых ниже температуры плавления чистых компонентов, предусмотрено раздельное описание твердого, жидкого и газообразного состояния индивидуальных веществ, аналогичное применяемому в [17]. Принципы экстраполяции термодинамических функций от температуры плавления к отчетной температуре (298,15 К) для веществ жидком состоянии описаны в [24].

Второй подход основан на следующих допущениях. В случае, когда для расчета термодинамических свойств используется «модель» твердого раствора, на первом этапе в качестве химического состава задается стехиометрическая формула минерала, для которого известен химический состав и определена энтальпия образования  $\Delta H_{f,298,15}$ . Главным достоинством этого подхода является то обстоятельство, что в список минералов твердого раствора это соединение не включается. Полученное решение сопоставляется с «эталонным» решением. При получении удовлетворительного результата задается общий химический состав данной минеральной фракции. Затем расчеты повторяются и снова сопоставляются с «эталонным». В результате расчетов определяется не только сводная энергия, энтальпия, энтропия минерала, но и его стехиометрическая формула. Следует учитывать, что элементы, не входящие в стехиометрическую формулу, но присутствующие в химическом составе, могут быть свидетелем существования других фаз.

Расчет термодинамических свойств смешанно-слоистых алюмосиликатов выполнен на основе результатов экспериментального термохимического изучения монтмориллонитов из Таганского месторождения и из кальдеры Узон (Камчатка), опубликованных в статье [25]. В качестве исходных данных использовались как составы мономинеральных фракций (табл. 1), так и стехиометрические формулы минералов.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) мономинеральных фаз монтмориллонитов

Table 1. Chemical composition (mass %) of monomineral phases of montmorillonites

Оксиды Oxides	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Σ
Таганский Tagansky	52,89	19,81	–	3,87	0,74	1,83	0,03	20,79	100
Камчатка Kamchatka	50,24	18,11	1,78	7,11	1,93	0,02	0,39	20,38	100
Таганский Tagansky	Na <sub>0,3</sub> Ca <sub>0,1</sub> (Mg <sub>0,4</sub> Al <sub>1,6</sub> )[Si <sub>3,9</sub> Al <sub>0,1</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub>								
Камчатка Kamchatka	K <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,2</sub> Mg <sub>0,8</sub> Al <sub>1,6</sub> Fe <sub>0,1</sub> Si <sub>3,7</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>								

Из исходного химического состава удалены элементы, не присутствующие в стехиометрических формулах монтмориллонитов (стронций, барий, марганец).

### Результаты

Расчет термодинамических свойств с помощью регрессионного анализа

С помощью регрессионного анализа уравнения (4) установлена зависимость стандартной энтропии силикатов лития, натрия и калия от состава:

$$\begin{aligned} S^\circ(x\text{Me}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2; \kappa; 298,15 \text{ K}) = \\ = 43,153x(\text{SiO}_2) + 38,366x(\text{Li}_2\text{O}) + \\ + 73,796x(\text{Na}_2\text{O}) + \\ + 103,426x(\text{K}_2\text{O}) \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отклонение вычисленных величин стандартной энтропии от литературных данных для некоторых силикатов объясняется завышением точности измерений и результатов их обработки авторами экспериментальных работ. Так, низкотемпературная калориметрия силикатов натрия [26] получена для интервала температур 53...298 К, её экстраполяция к абсолютному нулю температуры выполнена графически. Ошибка расчета стандартной энтропии на основе такой экстраполяции в [26] оценена в  $\pm 2,5$  Дж·К<sup>-1</sup>·моль<sup>-1</sup> для орто- и дисиликата натрия и  $\pm 1,3$  Дж·К<sup>-1</sup>·моль<sup>-1</sup> для метасиликата натрия. Обработка тех же измерений авторами [17] для орто- и дисиликата натрия дает величину ошибки  $\pm 4,2$  Дж·К<sup>-1</sup>·моль<sup>-1</sup>; для метасиликата натрия обработка не проводилась. Нами было показано [20], что при экстраполяции измерений теплоемкости [26] вероятная величина ошибки вычи-

сления стандартной энтропии составляет для метасиликата натрия  $\pm 3,73 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ , для дисиликата натрия  $\pm 6,55 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ , для ортосиликата натрия  $\pm 7,65 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ . С учетом этих данных результаты согласования и оценки стандартной энтропии силикатов щелочных металлов по (5) можно считать достоверными.

Зависимость стандартной энтальпии образования из простых веществ силикатов лития, натрия и калия от состава выражается формулой (6).

$$\begin{aligned} \Delta_f H^\circ(x\text{Me}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2; \text{к}; 298,15 \text{ К}) = \\ = -919,788x(\text{SiO}_2) - 720,705x(\text{Li}_2\text{O}) - \\ - 625,385x(\text{Na}_2\text{O}) - \\ - 650,962x(\text{K}_2\text{O}) \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Избыточные функции вкладов в (6) оксидов щелочных металлов,  $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ :  $b_{\text{Li}_2\text{O}}(Ex) = -122,825$ ;  $b_{\text{Na}_2\text{O}}(Ex) = -122,825$ ;  $b_{\text{K}_2\text{O}}(Ex) = -122,825$ . Вследствие строгой зависимости величины избыточных функций от молекулярной массы структурных составляющих отклонения вычисленных величин стандартной энтальпии образования от литературных данных не возникает. Следовательно, результаты оценки стандартной энтальпии образования силикатов щелочных металлов по (6) достоверны.

Полученные зависимости термодинамических свойств от типа структурных единиц позволили согласовать различающиеся величины термодинамических и термохимических потенциалов, а также оценить теплоты и температуры плавления не исследовавшихся ранее силикатов щелочных металлов методами, предложенными в [20]. Результаты приведены на рис. 1 и 2.

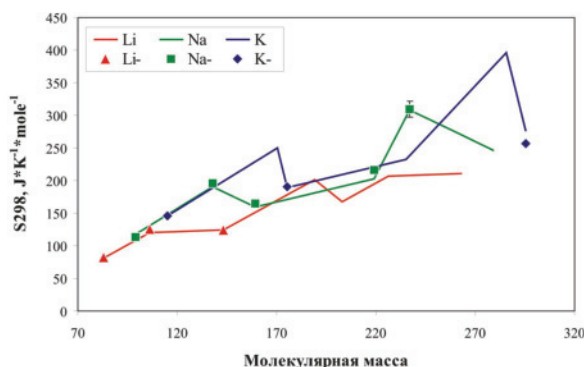


Рис. 1. Зависимость стандартной энтропии щелочных силикатов от молекулярной массы (сплошная линия – расчетные, маркеры – литературные данные)

Fig. 1. Dependence of standard entropy of alkali silicates on molecular weight (solid line – calculated, markers – literature data)

Как видно, расчетные тренды для стандартной энтропии силикатов лития, натрия и калия имеют ярко выраженный прямолинейный характер. Полученные величины сопоставимы с литературными данными. Для метасиликата калия расчеты и данные из литературы практически совпадают ( $146,6$  и  $146,2 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}$ , соответственно), а

для пиросиликата натрия ( $203,3 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$  и  $215,9 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ , соответственно) наблюдается относительная погрешность около  $5,8 \%$ . На рис. 2 показана зависимость для энтальпии образования, которая имеет обратную зависимость от величины молекулярной массы. При сопоставлении расчетных и литературных данных наблюдается удовлетворительный результат – во всех случаях отклонение не превышает  $3,7 \%$ .

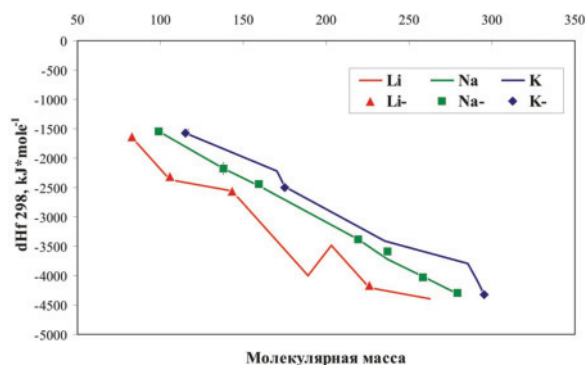


Рис. 2. Зависимость стандартной энтальпии образования от молекулярной массы для щелочных силикатов (сплошная линия – расчетные, маркеры – литературные данные)

Fig. 2. Dependence of standard enthalpy of formation on molecular weight for alkaline silicates (solid line – calculated, markers – literature data)

Расчет термодинамических свойств с помощью модели твердых растворов

В данном разделе представлены результаты определения стехиометрии и термодинамических свойств наиболее распространенных представителей глинистых минералов – монтмориллонитов. Структура монтмориллонита состоит из трехэтажных пакетов (слоев), в которых два внешних слоя представляют собой псевдогексагональную сетку  $\text{SiO}_4$ -тетраэдров, внутри которых расположен гиббитовый октаэдрический слой. Соотношение образующих пакеты тетраэдрических и октаэдрических сеток равно  $2:1$ . В структуре монтмориллонита эти трехэтажные пакеты разделяются межслоевыми промежутками, заполненными молекулами воды и обменными катионами типа  $\text{M}^+$ ,  $\text{M}^{++}$  (в природных образцах обычны Na, K, Ca, Mg).

Опубликовано большое количество работ, посвященных изучению состава, структуры и различных свойств природных и модифицированных монтмориллонитов [27]. Однако вследствие высокой дисперсности монтмориллонита экспериментальные результаты изучения его термодинамических свойств ограничены. Поэтому данные по химическому составу мономинеральной фракции и энтальпии образования монтмориллонитов, приведенные в статье [25], мы использовали как тест для проверки точности разработанного нами метода расчета стехиометрических формул и термодинамических свойств слоистых силикатов. Предла-



гаемый способ позволяет при помощи модели твердых растворов определять термодинамические свойства минералов с помощью метода минимизации свободной энергии, реализованного в универсальном программном комплексе (ПК) «Селектор» [2].

Основная цель данной работы – это подбор списка миналов для твердого раствора монтмориллонитов, представляющих собой набор условных стехиометрических единиц, которые позволяют с удовлетворительной точностью описывать химический состав, а следовательно, вычислять сводную стехиометрическую формулу этого минерала. Поскольку все миналы твердого раствора имеют индивидуальные термодинамические свойства, по величине их вклада в сводную стехиометрическую формулу минерала возможно вычисление её собственных термодинамических функций.

С целью проверки возможности решения поставленной задачи на первом этапе в качестве химического состава задается стехиометрическая формула минерала, для которого известен химический состав и определена энтальпия образования. В список миналов твердого раствора данная формула не включается. Полученное решение сопоставляется с данными, приведенными в статье, и в случае удовлетворительного результата задается химический состав мономинеральной фракции. Определяется не только стехиометрическая формула и энтальпия минерала, как это сделано в статье [25], но также свободная энергия Гиббса и энтропия минерала.

Рассчитанные для Таганского монтмориллонита стехиометрическая формула и энтальпия образования имеют значения, близкие к приведенным в статье [25]. Величина  $\Delta H_{f298,15}$ , рассчитанная по химическому составу, имеет меньшее отклонение от исходной, однако стехиометрическая формула минерала несколько отличается (табл. 2). Следовательно, химический состав мономинеральной фракции содержит примеси, не относящиеся к структуре монтмориллонита, в основном это кремний и алюминий. Тем не менее для данного минерала твердый раствор не нуждается в корректировке. В результате для таганского монтмориллонита ( $\text{Na}_{0,268}\text{Ca}_{0,06}\text{Mg}_{0,227}\text{Al}_{1,75}\text{Si}_{3,97}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) определены следующие термодинамические параметры  $\Delta H_{f298,15} = 5684459$  Дж/моль,  $\Delta G_{f298,15} = 5342027$  Дж/моль,  $S = 364,308$  Дж/К.

Особенности состава камчатского монтмориллонита обусловили то, что даже в случае использования стехиометрической формулы, предложенной Огородовой, удовлетворительной сходимости величин энтальпии достичь не удастся. Дело в том, что в химическом составе присутствуют окислы натрия, марганца, титана, бария стронция, которые отсутствуют в стехиометрической формуле камчатского монтмориллонита (табл. 1, 2). Вероятно, что для заданной стехиометрии в заданном нами твердом растворе нет подходящих кальциевых миналов. В том случае, когда расчет выполнялся по химическому составу, отклонения в рас-

считанной величине энтальпии минимальны 3615 Дж/моль. Однако стехиометрическая формула отличается значительно (табл. 2). Дело в том, что в исходном химическом составе количество элементов примесей велико, поэтому реальное соотношение основных структурных элементов искажено. Наиболее верным решением будет пересчет исходного химического состава на 100 % после удаления примесей магния, бария, стронция и т. д.

По общему химическому составу получена следующая стехиометрическая формула минерала  $\text{K}_{0,04}\text{Na}_{0,003}\text{Ca}_{0,16}\text{Mg}_{0,44}\text{Al}_{1,69}\text{Fe}_{0,1}\text{Si}_{3,984}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  и определены термодинамические параметры:  $\Delta G_{f298,15} = -5416181$  Дж/моль,  $S = 507,489$  Дж/К.

**Таблица 2.** Сравнение расчетных данных с исходными расчетами [25]

**Table 2.** Comparison of calculated data with initial calculations [25]

Данные Data	Формула Formula	$\Delta_f H^\circ$ (298 К) (J/mol)
Таганский монтмориллонит / Tagansky montmorillonite		
Исходные Initial	$\text{Na}_{0,3}\text{Ca}_{0,1}\text{Mg}_{0,4}\text{Al}_{1,7}\text{Si}_{3,9}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5677600
Расчетные Calculated (1)	$\text{Na}_{0,3}\text{Ca}_{0,1}\text{Mg}_{0,4}\text{Al}_{1,7}\text{Si}_{3,9}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5731269
Расчетные Calculated (2)	$\text{Na}_{0,27}\text{Ca}_{0,06}\text{Mg}_{0,22}\text{Al}_{1,75}\text{Si}_{3,97}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5684459
Камчатский монтмориллонит / Kamchatsky montmorillonite		
Исходные Data	$\text{K}_{0,1}\text{Ca}_{0,2}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,6}\text{Fe}_{0,1}\text{Si}_{3,7}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5719000
Расчетные Calculated (1)	$\text{K}_{0,1}\text{Ca}_{0,2}\text{Mg}_{0,83}\text{Al}_{1,66}\text{Fe}_{0,1}\text{Si}_{3,84}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5974800
Расчетные Calculated (2)	$\text{K}_{0,04}\text{Na}_{0,003}\text{Ca}_{0,16}\text{Mg}_{0,44}\text{Al}_{1,69}\text{Fe}_{0,1}\text{Si}_{3,984}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5715385

Примечание: Расчетные (1) – по стехиометрической формуле (по миналам); Расчетные (2) – по общему химическому составу (по окислам).

Note: Calculated (1) – by stoichiometric formula (by minals); Calculated (2) – by general chemical composition (by oxides).

### Заключение

Предложены уравнения регрессии, позволяющие рассчитывать термодинамические характеристики силикатов. Абсолютная погрешность расчета методом регрессионного анализа стандартных энтропий и энтальпий образования силикатов лития, натрия и калия не превысила 5,8 %. Предлагаемый способ расчета стехиометрической формулы и энтальпии образования методом минимизации свободной энергии позволяет получать значения, сопоставимые с полученными другими методами, например методом расплавной калориметрии растворения или расчета величины стандартных энтальпий их образования из элементов. Однако в отличие от других методов возможно получение согласованных величин энтропии и энергии Гиббса. Полученные результаты свидетельствуют о том, что химические составы мономинеральных фракций неидеальны. Поэтому, если стехиометриче-



ский состав минерала известен заранее, а его термодинамические свойства не известны, удобнее выполнять расчет не по списку минералов, а по окислам, как это сделано в [25], но если формула не известна, следует действовать методом последующих приближений: выполнять расчет равновесного состава системы, используя метод минимизации тер-

модинамических потенциалов, после каждого расчета корректировать химический состав, удаляя как примеси, так и избыточные компоненты.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 16-35-60045 и № 18-05-00079), а также гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-5863.2016.5).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minimization of Gibbs free energy in geochemical systems by convex programming / I.K. Karpov, K.V. Chudnenko, V.A. Bychinskii, D.A. Kulik, O.V. Avchenko // *Geochemistry International*. – 2001. – V. 39. – № 11. – P. 1108–1119.
2. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. – Новосибирск: Академическое издание «Гео», 2010. – 287 с.
3. Mysen B.O., Frantz J.D. Raman-spectroscopy of silicate melts at magmatic temperatures – Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> and Li<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> binary compositions in the temperature-range 25–1475 °C // *Chemical Geology*. – 1992. – V. 96. – № 3–4. – P. 321–332.
4. Koroleva O.N. The structure of lithium silicate melts revealed by high-temperature Raman spectroscopy // *Spectroscopy Letters*. – 2017. – V. 50. – № 5. – P. 257–264.
5. Bykov V.N., Ivanova T.N., Koroleva O.N. Raman spectroscopy of borosilicate and germanate-silicate glasses and melts // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2011. – V. 2011. – № 8. – P. 719–722.
6. Direct and indirect evidence for free oxygen (O<sub>2</sub>) in MO-silicate glasses and melts (M=Mg, Ca, Pb) / H.W. Nesbitt, G.M. Bancroft, G.S. Henderson, R. Sawyer, R.A. Secco // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – № 11–12. – P. 2566–2578.
7. Le Losq C., Mysen B.O., Cody G.D. Water and magmas: insights about the water solution mechanisms in alkali silicate melts from infrared, Raman, and <sup>29</sup>Si solid-state NMR spectroscopies // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2015. – V. 2. – № 1. – P. 1–16.
8. Charles Le L., George D.C., Bjorn O.M. Complex IR spectra of OH groups in silicate glasses: Implications for the use of the 4500 cm<sup>-1</sup> IR peak as a marker of OH groups concentration // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – № 4. – P. 945–950.
9. Celia D., Bjorn O.M. The effect of H<sub>2</sub>O on F and Cl solubility and solution mechanisms of in aluminosilicate melts at high pressure and high temperature // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – № 2–3. – P. 633–643.
10. New insights into the structure and physical properties of sodium and potassium germanate glass via the phase diagram approach / W.J. Zhang, W.C. Wang, Q.Y. Zhang, Z.H. Jiang // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2017. – V. 475. – P. 108–115.
11. Thermal and structural analysis of germanate glass and thin films co-doped with silver nanoparticles and rare earth ions with insights from visible and Raman spectroscopy / E.A. Carvalho, A.M. Freitas, G.H. Silva, M.J.V. Bell, L.R.P. Kassab, V. Anjos // *Vibrational Spectroscopy*. – 2016. – V. 87. – P. 143–148.
12. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. – М.: Наука, 2000. – 363 с.
13. Bykov V.N., Koroleva O.N. Thermodynamic simulation of the behavior of network-modifying cations in multicomponent silicate melts // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 11. – P. 1128–1130.
14. Koroleva O.N., Tupitsyn A.A., Bychinskii V.A. Physicochemical model of sodium silicate melts and thermodynamics of Q<sup>n</sup>-species // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 716. – P. 490–496.
15. Physicochemical model as a method for calculating and making consistent thermodynamic properties of structural units in alkali silicate melts / O.N. Koroleva, V.A. Bychinskii, A.A. Tupitsyn, M.V. Shtenberg, V.A. Krenev, S.V. Fomichev // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2015. – V. 60. – № 9. – P. 1104–1109.
16. Models of solid solutions for calculation of the mineral composition of Lake Baikal bottom sediments: A new approach to paleoclimatic reconstructions / A.V. Oshchepkova, M.I. Kuzmin, V.A. Bychinski, E.P. Solotchina, K.V. Chudnenko // *Doklady Earth Sciences*. – 2015. – V. 461. – № 2. – P. 364–367.
17. JANAF thermochemical tables. 3 ed. / Ed. by M.W. Chase. – Washington: National Institute of Standards and Technology, 1985. – V. 14. – 926 p.
18. Термические константы веществ: справочник. 2 изд. / Сост. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1981. – Т. 10. – Ч. 2. – 441 с.
19. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник. 3 изд. / сост. Л.В. Гурвич. – М.: Наука, 1982. – Т. 4. – Кн. 1. – 623 с.
20. Подготовка термодинамических свойств индивидуальных веществ к физико-химическому моделированию высокотемпературных технологических процессов / А.А. Тулицын, А.В. Мухомедина, В.А. Бычинский, Н.А. Корчевин. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 2009. – 303 с.
21. Specifics of representation of thermodynamic functions in the method of thermodynamic potential minimization / V.A. Bychinskii, A.A. Tupitsyn, O.N. Koroleva, K.V. Chudnenko, S.V. Fomichev, V.A. Krenev. // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2013. – V. 58. – № 7. – P. 824–829.
22. Булах А.Г., Золотарёв А.А., Кривовичев В.Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. – СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2014. – 133 с.
23. Бабушкин В.И., Мчедлов-Петросян О.П., Матвеев Г.М. Термодинамика силикатов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 351 с.
24. Extrapolation of thermodynamic functions in calculation of phase equilibria by the Gibbs energy minimization method / V.A. Bychinskii, A.A. Tupitsyn, K.V. Chudnenko, A.V. Mukhomedina, S.V. Fomichev, V.A. Krenev // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2013. – V. 58. – № 10. – P. 1197–1202.
25. Термохимическое изучение природного монтмориллонита / Л.П. Огородова, И.А. Киселева, Л.В. Мельчакова, М.Ф. Вигасина, В.В. Крупская // *Геохимия*. – 2013. – № 6. – С. 541–551.
26. Kelley K.K. The specific heats at low temperatures of crystalline ortho-, meta-, and disilicates of sodium // *Journal of the American Chemical Society*. – 1939. – V. 61. – № 2. – P. 471–473.
27. Минералы. Справочник / сост. Ф.В. Чухров. – М.: Наука, 1992. – Т. 4. – Вып. 1. – 598 с.

*Поступила 08.12.2017 г.*

**Информация об авторах**

**Бычинский В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии СО РАН.

**Королева О.Н.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института минералогии УрО РАН.

**Ощепкова А.В.**, младший научный сотрудник Института геохимии СО РАН.

**Штенберг М.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института минералогии УрО РАН.

UDC 544.3

## METHODS OF DETERMINING THERMODYNAMIC PROPERTIES OF SUBSTANCES FOR STUDYING NATURAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES BY THE PHYSICAL-CHEMICAL MODELING METHODS

**Valery A. Bychinsky<sup>1</sup>,**  
val@igc.irk.ru

**Olga N. Koroleva<sup>2,3</sup>,**  
olgankoroleva@gmail.com

**Anastasiya V. Oshchepkova<sup>1</sup>,**  
oshepkova-anasta@mail.ru

**Mikhail V. Shtenberg<sup>2</sup>,**  
shtenberg@mineralogy.ru

<sup>1</sup> Institute of Geochemistry SB RAS,  
1A, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

<sup>2</sup> Institute of mineralogy UrB RAS,  
Ilmeny Reserve, Miass, 456317, Russia.

<sup>3</sup> South Ural State University, branch in Miass,  
37, Kalinin street, Miass, 456304, Russia.

*The authors have developed the method of calculation of thermodynamic properties of natural and artificial minerals, which is an effective complement of labor-intensive and high-cost experimental studies. This method makes it possible to calculate with sufficient accuracy the chemical composition of stoichiometric formulas, enthalpy, Gibbs energy, entropy and heat capacity values of previously unexplored compounds. These parameters are necessary to determine the conditions of formation of these components and possible ways of further use in technological processes.*

**The aim** of the research is to compare the capabilities and features of applying the calculation methods of thermodynamic properties using regression analysis and minimization of free energy on the example of alkaline silicates and clay minerals and to compare the obtained values with the experimental data.

**The methods:** two basic methods for determining thermodynamic properties of compounds: regression analysis based on the classical additive Neumann–Kopp method, and calculation by minimizing free energy using the model of ideal solid solution (program complex «Selector»).

**The results.** The authors have calculated thermodynamic properties using regression analysis. The paper demonstrates a good correspondence of the experimental data, based on the literary sources, and calculation of the values of enthalpy and entropy of formation for alkaline silicates. The calculation of thermodynamic properties by minimizing free energy and the model of ideal solid solutions of mixed-layer aluminosilicates allowed determining the summary stoichiometric formula, Gibbs energy, enthalpy of formation and entropy of montmorillonites and chlorites by chemical composition. The obtained values are comparable with the results of melt calorimetry of dissolution and reference data in accuracy. The results showed that the chemical composition of monomineral fractions is not ideal. Therefore, if the mineral formula is known in advance, the calculation of thermodynamic properties by minimizing the thermodynamic potentials is more convenient to perform on the stoichiometric formula, correcting the list of minerals of the solid solution.

### Key words:

Alkaline silicates, mixed-layer aluminosilicates, regression analysis, physico-chemical modeling, solid solutions model.

*The research was supported by the RFBR grants (no. 16–35–60045, 18–05–00079), as well as the grant of the President of the Russian Federation for State support of young Russian scholars (MK-5863.2016.5).*

### REFERENCES

1. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Bychinskii V.A., Kulik D.A., Avchenko O.V. Minimization of Gibbs free energy in geochemical systems by convex programming. *Geochemistry International*, 2001, vol. 39, no. 11, pp. 1108–1119.
2. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimi: teoriya, algoritmy, programnoe obespechenie, prilozheniya* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 287 p.
3. Mysen B.O., Frantz J.D. Raman-spectroscopy of silicate melts at magmatic temperatures – Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> and Li<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> binary compositions in the temperature-range 25–1475 °C. *Chemical Geology*, 1992, vol. 96, no. 3–4, pp. 321–332.
4. Koroleva O.N. The structure of lithium silicate melts revealed by high-temperature Raman spectroscopy. *Spectroscopy Letters*, 2017, vol. 50, no. 5, pp. 257–264.
5. Bykov V.N., Ivanova T.N., Koroleva O.N. Raman spectroscopy of borosilicate and germanate-silicate glasses and melts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, vol. 2011, no. 8, pp. 719–722.
6. Nesbitt H.W., Bancroft G.M., Henderson G.S., Sawyer R., Seco R.A. Direct and indirect evidence for free oxygen (O<sub>2</sub>) in MO-silicate glasses and melts (M=Mg, Ca, Pb). *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, no. 11–12, pp. 2566–2578.

7. Le Losq C., Mysen B.O., Cody G.D. Water and magmas: insights about the water solution mechanisms in alkali silicate melts from infrared, Raman, and  $^{29}\text{Si}$  solid-state NMR spectroscopies. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 1–16.
8. Charles Le L., George D.C., Bjorn O.M. Complex IR spectra of OH groups in silicate glasses: Implications for the use of the 4500  $\text{cm}^{-1}$  IR peak as a marker of OH groups concentration. *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, no. 4, pp. 945–950.
9. Celia D., Bjorn O.M. The effect of  $\text{H}_2\text{O}$  on F and Cl solubility and solution mechanisms of in aluminosilicate melts at high pressure and high temperature. *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, no. 2–3, pp. 633–643.
10. Zhang W.J., Wang W.C., Zhang Q.Y., Jiang Z.H. New insights into the structure and physical properties of sodium and potassium germanate glass via the phase diagram approach. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, vol. 475, pp. 108–115.
11. Carvalho E.A., Freitas A.M., Silva G.H., Bell M.J.V., Kasab L.R.P., Anjos V. Thermal and structural analysis of germanate glass and thin films co-doped with silver nanoparticles and rare earth ions with insights from visible and Raman spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 2016, vol. 87, pp. 143–148.
12. Ariskin A.A., Barmina G.S. *Modelirovanie fazovykh ravnovesiy pri kristallizatsii bazaltovykh magm* [Simulation of phase equilibria at the crystallization of basaltic magmas]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 363 p.
13. Bykov V.N., Koroleva O.N. Thermodynamic simulation of the behavior of network-modifying cations in multicomponent silicate melts. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 11, pp. 1128–1130.
14. Koroleva O.N., Tupitsyn A.A., Bychinsky V.A. Physicochemical model of sodium silicate melts and thermodynamics of  $Q^n$ -species. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 716, pp. 490–496.
15. Koroleva O.N., Bychinskii V.A., Tupitsyn A.A., Shtenberg M.V., Krenev V.A., Fomichev S.V. Physicochemical model as a method for calculating and making consistent thermodynamic properties of structural units in alkali silicate melts. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1104–1109.
16. Oshchepkova A.V., Kuzmin M.I., Bychinski V.A., Solotchina E.P., Chudnenko K.V. Models of solid solutions for calculation of the mineral composition of Lake Baikal bottom sediments: A new approach to paleoclimatic reconstructions. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 364–367.
17. JANAF thermochemical tables. 3 ed. Ed. by M.W. Chase. Washington, National Institute of Standards and Technology, 1985. Vol. 14, 926 p.
18. *Termicheskie konstanty veshchestv: spravochnik* [Thermal constants of substances: Reference book]. Ed. by V.P. Glushko. Moscow, VINITI Publ., 1981. Vol. 10, P. 2, 441 p.
19. *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv: spravochnik* [Thermodynamic properties of individual substances: Reference book]. Ed. by L.V. Gurvich. Moscow, Nauka Publ., 1982. Vol. 4, B. 1, 623 p.
20. Tupitsyn A.A., Mukhetdinova A.V., Bychinskii V.A. *Podgotovka termodinamicheskikh svoystv individualnykh veshchestv k fiziko-khimicheskomu modelirovaniyu vysokotemperaturnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Preparation of thermodynamic properties of individual substances by physico-chemical modeling of high-temperature technological processes]. Irkutsk, Irkutsk state University Publ., 2009. 303 p.
21. Bychinskii V.A., Tupitsyn A.A., Koroleva O.N., Chudnenko K.V., Fomichev S.V., Krenev V.A. Specifics of representation of thermodynamic functions in the method of thermodynamic potential minimization. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 824–829.
22. Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Struktura, izomorfizm, formuly, klassifikatsiya mineralov* [Structure, isomorphism, formulas and classification of minerals]. St. Petersburg, St. Petersburg University Press, 2014. 133 p.
23. Babushkin V.I., Mchedlov-Petrosyan O.P., Matveev G.M. *Termodinamika silikatov* [Thermodynamics of silicates]. Moscow, Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1972. 351 p.
24. Bychinskii V.A., Tupitsyn A.A., Chudnenko K.V., Mukhetdinova A.V., Fomichev S.V., Krenev V.A. Extrapolation of thermodynamic functions in calculation of phase equilibria by the Gibbs energy minimization method. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2013, vol. 58, no. 10, pp. 1197–1202.
25. Ogorodova L.P., Kiseleva I.A., Melchakova L.V., Krupskaya V.V., Vigasina M.F. Thermochemical study of natural montmorillonite. *Geochemistry International*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 484–494.
26. Kelley K.K. The specific heats at low temperatures of crystalline ortho-, meta-, and disilicates of sodium. *Journal of the American Chemical Society*, 1939, vol. 61, no. 2, pp. 471–473.
27. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Ed. by F.V. Chukhrov. Moscow, Nauka Publ., 1992. Vol. 4, Iss. 1, 598 p.

Received: 8 December 2017.

#### Information about the authors

**Valery A. Bychinsky**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geochemistry SB RAS.

**Olga N. Koroleva**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of mineralogy UrB RAS; associate professor, South Ural State University, branch in Miass.

**Anastasiya V. Oshchepkova**, junior researcher, Institute of Geochemistry SB RAS.

**Mikhail V. Shtenberg**, Cand. Sc., researcher, Institute of mineralogy UrB RAS.



УДК 622.244.442

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНИЗИТЕЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ КАРБОКСИМЕТИЛЬНЫХ ЭФИРОВ КРАХМАЛА И ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Минаев Константин Мадестович<sup>1</sup>,  
minaevkm@tpu.ru

Яновский Вячеслав Александрович<sup>2</sup>,  
yavatpu@yandex.ru

Минаева Дарья Олеговна<sup>2</sup>,  
dashyctrik@gmail.com

Захаров Алексей Сергеевич<sup>1</sup>,  
aszakharov1994@mail.ru

Сагитов Рашид Равильевич<sup>1</sup>,  
sagitov\_r@bk.ru

Андропов Михаил Олегович<sup>2</sup>,  
hudojnick@ya.ru

Пандей Сушил Кумар<sup>1</sup>,  
sushil\_pandey@live.com

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

<sup>2</sup> Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью снижения стоимости используемых в буровых растворах полисахаридных реагентов, а соответственно и стоимости строительства скважины. Это направление исследований позволит определить области применения реагентов на основе карбоксиметилированного крахмала в современных рецептурах буровых растворов.

**Цель исследования:** изучение свойств современных рецептур буровых растворов с использованием в качестве понизителя фильтрации карбоксиметилкрахмала и низковязкой полианионной целлюлозы, оценка устойчивости буровых растворов с использованием данных реагентов к воздействию солей, температур и биологической деструкции.

**Объекты исследования:** современные системы полимер-глинистых, минерализованных полимер-глинистых и биополимерных буровых растворов, содержащих понизители фильтрации на основе карбоксиметилированной целлюлозы и крахмала.

**Методы:** инструментальные методы определения параметров буровых растворов по ГОСТ 33213–2014 и РД 39–00147001–773–2004 (фильтрационные и реологические свойства); свойства полисахаридных реагентов, согласно ASTM D1439–15.

**Результаты.** Проведены сравнительные исследования полимер-глинистых и биополимерных буровых растворов с использованием карбоксиметилкрахмала и низковязкой полианионной целлюлозы в качестве понизителей фильтрации. Показано, что буровые растворы с использованием низковязкой полианионной целлюлозы обладают большей пластической вязкостью и динамическим напряжением, однако структурно-механические свойства буровых растворов выше при введении карбоксиметилкрахмала. Последний, как понизитель фильтрации, обладает низкой эффективностью в минерализованных буровых растворах, при этом в условиях низких температур обеспечивает фактически равную по сравнению с низковязкой полианионной целлюлозой фильтрацию в полимер-глинистых и биополимерных растворах. Установлено, что карбоксиметилкрахмал может использоваться как альтернатива низковязкой полианионной целлюлозе в полимер-глинистых и биополимерных буровых растворах при бурении скважин с умеренными забойными температурами.

### Ключевые слова:

Карбоксиметилкрахмал, карбоксиметилцеллюлоза, полианионная целлюлоза, буровой раствор, понизитель фильтрации.

### Введение

На текущем этапе развития технологии строительства нефтяных и газовых скважин буровой раствор – это сложная дисперсная система с регулируемыми физико-химическими и технологическими свойствами. Значительную долю промышленно применяемых буровых растворов составляют полимер-глинистые и биополимерные растворы, за

регулирование реологических и фильтрационных свойств которых отвечают такие полисахаридные реагенты, как карбоксиметилированные крахмал и целлюлоза, ксантановая смола и водорастворимые крахмалы [1, 2]. Однако, несмотря на некоторую общность состава полисахаридов, по преобладающей функции их можно разделить на структурообразователи (ксантановая смола, высокомоле-

кулярная карбоксиметилированная целлюлоза и др.) и понизители фильтрации (водорастворимый крахмал, низкомолекулярная карбоксиметилированная целлюлоза и карбоксиметилкрахмал и др.) [3–5].

Фильтрационные процессы при бурении скважины играют одну из важнейших ролей для сохранения проницаемости продуктивного пласта, предупреждения аварийности и осложнений [6]. Под действием дифференциального давления твердая фаза бурового раствора проникает в приствольную зону скважины, образуя корку, через которую проходит фильтрат бурового раствора. При высокой проницаемости фильтрационной корки она увеличивается в размерах, что приводит к уменьшению эффективного диаметра скважины и вызывает различные осложнения, такие как чрезмерный момент при вращении и импульсы давления при подъеме бурильного инструмента, чрезмерное гидравлическое сопротивление, что, в свою очередь, приводит к осыпям и обвалам, а также к увеличению вероятности дифференциального прихвата и затяжки колонны и инструмента во время спуско-подъемных операций [7]. Для снижения проницаемости фильтрационной корки и, соответственно, уменьшения количества фильтрата буровой раствор обрабатывают полимерными реагентами – понизителями фильтрации. В современных рецептурах буровых растворах понизители фильтрации представлены по большей части низкомолекулярными карбоксиметилированными производными целлюлозы, а именно низковязкой карбоксиметилцеллюлозой (НВ КМЦ) со степенью замещения около 85 и низковязкой полианионной целлюлозой (НВ ПАЦ) со степенью замещения более 90 и большим содержанием основного вещества в сравнении с НВ КМЦ [8, 9]. Эти небольшие отличия структуры и состава НВ ПАЦ от НВ КМЦ оказывают значительное влияние на основные потребительские свойства этого полимера. НВ ПАЦ обладает повышенной соле- и термостойкостью, что значительно расширяет диапазон ее применения.

Реагенты на основе крахмала на данный момент нашли ограниченное применение в системах буровых растворов для вскрытия продуктивного пласта, поскольку сформированная фильтрационная корка, содержащая производные крахмала, в результате биодеструкции и/или под воздействием кислотной обработки разрушается, что минимизирует негативное воздействие бурового раствора на фильтрационно-емкостные свойства коллектора. При бурении других интервалов производные крахмала в качестве понизителя фильтрации применяются редко и зачастую в составе солевых растворов, снижающих скорость биодegradации полимера по сравнению с пресными системами. Устранить этот недостаток и повысить термостабильность может введение значительного количества карбоксиметильных групп в структуру полимера. Экономическая целесообразность этого решения обеспечивается на 30–50 % меньшей себе-

стоимостью по сравнению с НВ ПАЦ. Чаще всего КМК производят из кукурузного или картофельного крахмала [10]. Производители карбоксиметилированного крахмала (КМК) рекомендуют использовать КМК для всех типов буровых растворов на водной основе, в том числе как эффективную замену ПАЦ НВ, однако полноценных исследований, подтверждающих эффективность и возможность замены ПАЦ и КМЦ, на КМК проведено не было. В нашей работе мы провели исследование свойств основных современных типов буровых растворов с использованием в качестве понизителей фильтрации КМК и ПАЦ НВ. Модельными системами буровых растворов выбраны следующие типы буровых растворов: полимер-глинистый пресный, полимер-глинистый минерализованный, биополимерный безглинистый хлоркалийевый. Рецептуры исследуемых буровых растворов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Модельные системы буровых растворов

Table 1. Model systems of drilling muds/fluids

Наименование модельного бурового раствора Model of drilling muds	Наименование компонента Component	Содержание, % мас. Content, wt. %
Полимер-глинистый Polymer-clay	Каустическая сода Sodium hydroxide	0,05
	ПБМБ (пр-во Хакасский бентонит) PBMB (production of Khakassian bentonite)	5,00
	Исследуемый полисахаридный реагент Tested polysaccharidic reagent	1,00
Минерализованный полимер-глинистый Mineralized polymer-clay	Каустическая сода Sodium hydroxide	0,05
	ПБМБ (пр-во Хакасский бентонит) PBMB (production of Khakassian bentonite)	7,00
	Хлорид натрия Sodium chloride	31,10
	Исследуемый полисахаридный реагент Tested polysaccharidic reagent	1,00
Биополимерный Biopolymer	Каустическая сода Sodium hydroxide	0,05
	Ксантановая смола Saboxan (пр-во Спринг) Xanthan gum Saboxan (production of Spring)	0,30
	Хлорид калия Potassium chloride	8,00
	Мраморная крошка МК-4 Marble chips МК-4	5,00
	Исследуемый полисахаридный реагент Tested polysaccharidic reagent	1,00

Основные технологические свойства буровых растворов определяли по ГОСТ 33213–2014 [11]. В качестве исследуемых реагентов выбраны карбоксиметильные эфиры целлюлозы и крахмала. Свойства полисахаридных реагентов определяли согласно [12], результаты представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Свойства ПАЦ НВ и КМК

**Table 2.** PAC LV and CMS properties

Наименование показателя Property	ПАЦ НВ PAC LV	КМК CMS
Внешний вид Appearance	белый порошок white powder	
Массовая доля воды, % Mass content of water, %	7,3	8,2
Динамическая вязкость 2 % водного раствора при 20 °С, мПа·с (скорость сдвига 132 с <sup>-1</sup> , шпindelь SC4-18) Dynamic viscosity of 2 % aqueous solution at 20 °C, mPa·s (Shear rate 132 s <sup>-1</sup> , spindle SC4-18)	215,7	44,8
Степень замещения Degree of substitution	92,0	29,3
Массовая доля основного вещества в продукте, % Mass content of main substance in product, %	94,0	95,7
pH 1 % раствора pH of 1 % solution	7,3	8,1

Согласно полученным результатам КМК имеет значительно меньшую вязкость и степень замещения по сравнению с ПАЦ НВ. Большинство коммерчески производимых реагентов КМК имеет степень замещения не выше 30 [13].

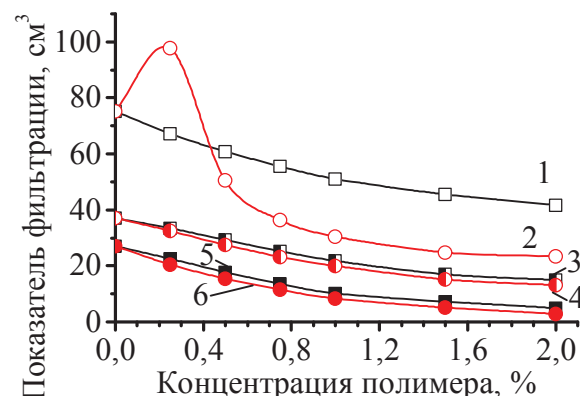
#### Исследование фильтрационных свойств буровых растворов

КМК имеет низкую молекулярную массу и соответственно меньшую вязкость относительно реагентов на основе карбоксиметилцеллюлозы, основной областью его применения в составе рецептур буровых растворов является контроль фильтрации без значительного воздействия на реологические параметры раствора [14]. Фильтрационные свойства разных типов буровых растворов исследовали с помощью стандартного фильтр-пресса низкого давления и низкой температуры (OFI Testing Equipment). На рис. 1 представлена зависимость показателя фильтрации бурового раствора от концентрации исследуемых реагентов для разных типов буровых растворов.

Проведенные исследования показали, что в системах полимер-глинистого и биополимерного раствора КМК как понизитель фильтрации не уступает ПАЦ НВ, однако в условиях высокой минерализации эффективность КМК снижается, поэтому в растворах, использующих морскую воду или минерализованные среды, КМК заменить ПАЦ НВ не может. Недостаточная стабильность КМК в условиях наличия высокой минерализации объясняется низкой степенью замещения [15]. В связи с этим последующие исследования фильтрационных свойств были проведены для полимер-глинистого и биополимерного раствора.

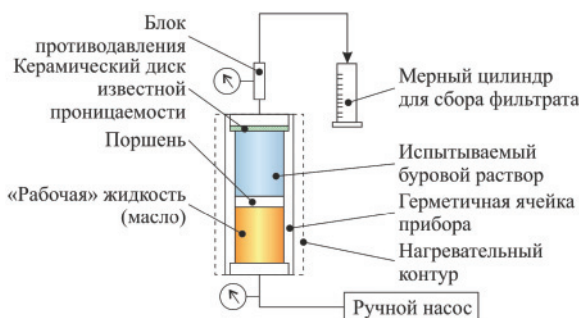
Фильтрационные свойства буровых растворов в условиях, приближенных к пластовым, испытывали с помощью тампонирующего аппарата для измерения проницаемости Permeability Plugging

Tester, Р.Р.Т (OFI Testing Equipment). Схема тестера проницаемости приведена на рис. 2.



**Рис. 1.** Зависимость фильтрации буровых растворов от концентрации понизителей фильтрации: 1 – минерализованный полимерглинистый, КМК; 2 – минерализованный полимерглинистый, ПАЦ НВ; 3 – биополимерный, КМК; 4 – биополимерный, ПАЦ НВ; 5 – полимерглинистый, КМК; 6 – полимерглинистый, ПАЦ НВ

**Fig. 1.** Dependence of drilling mud filtration on concentration of filtering reducers: 1 is the mineralized polymer-clay, CMS; 2 is the mineralized polymer-clay, PAC LV; 3 is the biopolymer, CMS; 4 is the biopolymer, PAC LV; 5 is the polymer-clay, CMS; 6 is the polymer-clay, PAC LV



**Рис. 2.** Схема тестера проницаемости тампонирующих материалов OFITE

**Fig. 2.** Scheme of Permeability Plugging Material Tester OFITE

В качестве фильтрующего материала были использованы керамические диски проницаемостью 0,8 и 10 дарси (диаметр пор 5 и 35 мкм, соответственно). Исследования проводили при дифференциальных давлениях 0,7 и 3,5 МПа и температурах 90 и 140 °С.

При температуре 90 °С и диаметре пор диска 5 мкм фильтрационные свойства полимер-глинистого бурового раствора с использованием КМК и ПАЦ НВ практически не отличаются (рис. 3). При увеличении диаметра пор до 35 мкм и проницаемости диска до 10 дарси буровой раствор с использованием ПАЦ НВ формирует менее проницаемую корку, в результате чего фильтрата образуется значительно меньше, чем с использованием бурового раствора с КМК. По всей видимости, КМК, обладая меньшей молекулярной массой и меньшей степе-

ню замещения, не способен к такой же эффективной адсорбции на поверхности глинистых частиц, как ПАЦ НВ. При этом не образуются глобулы достаточных размеров для эффективной закупорки пор большего диаметра (35 мкм). При увеличении температуры до 140 °С (рис. 4) количество фильтрата бурового раствора с использованием КМК значительно выше, чем для бурового раствора, содержащего ПАЦ НВ. Фильтрационная корка при этом формируется значительно медленней, о чем можно судить по величине мгновенной фильтрации. Мгновенная фильтрация определяет объем фильтрата, который прошел через керамический диск до момента формирования фильтрационной корки, ее определяют как отрезок на оси ординат, образованный касательной, проведенной к графику зависимости объема фильтрата от времени в интервале от 7,5 до 30 минут [7]. Кроме того, объем фильтрата для бурового раствора, содержащего КМК, увеличивается с большей скоростью по сравнению с раствором, содержащим ПАЦ НВ, в то время как зависимость объема фильтрата от времени для бурового раствора на основе ПАЦ НВ выходит на плато и фактически не меняется со временем. Можно предположить, что данная закономерность обусловлена термической деструкцией, гидролизом и деполимеризацией крахмального реагента, в результате чего образуются продукты, не обладающие защитными свойствами для коллоидных глинистых суспензий, об этом можно судить по увеличению в 2 раза концентрации моносахаридов в фильтрате бурового раствора при высокой температуре. Кроме того, уменьшается молекулярная масса полимера и, соответственно, вязкость дисперсной среды бурового раствора, что влечет за собой увеличение объема регистрируемого фильтрата.

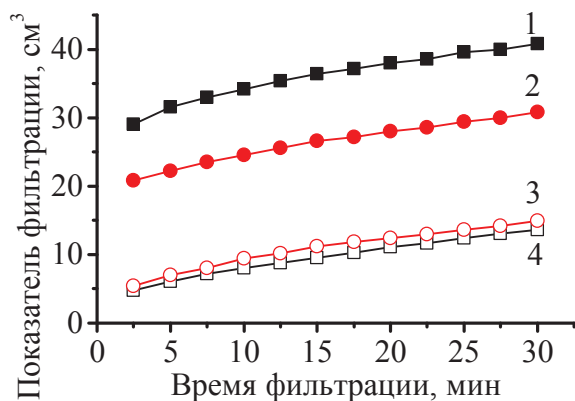


Рис. 3. Зависимость фильтрации полимерглинистого бурового раствора от времени при давлении 3,5 МПа и температуре 90 °С: 1 – КМК, 35 мкм; 2 – ПАЦ НВ, 35 мкм; 3 – КМК, 5 мкм; 4 – ПАЦ НВ, 5 мкм

Fig. 3. Dependence of filtration of polymer-clay drilling mud on time at a pressure of 3,5 MPa and a temperature of 90 °С: 1 – CMS, 35 μm; 2 – PAC LV, 35 μm; 3 – CMS, 5 μm; 4 – PAC LV, 5 μm

Согласно закону Дарси [16], объем фильтрата при двух различных значениях давления должен

быть пропорционален квадратному корню из этих величин, если принять, что все прочие параметры (время, площадь, вязкость и проницаемость) неизменны. Это условие не выполняется, так как фильтрационная корка, формируемая большинством буровых растворов, сжимаема, поэтому проницаемость ее непостоянна и уменьшается с повышением давления. Сжимаемость фильтрационной корки и снижение проницаемости являются благоприятными факторами, способствующими снижению фильтрации и толщины фильтрационной корки. В табл. 3 представлены результаты измерения количества фильтрата, полученного при низком (0,7 МПа) и высоком (3,5 МПа) давлении, полученные для буровых растворов, содержащих КМК и ПАЦ НВ.

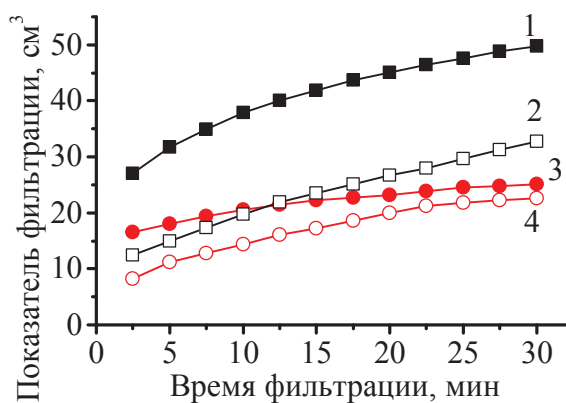


Рис. 4. Зависимость фильтрации полимерглинистого бурового раствора от времени при давлении 3,5 МПа и температуре 140 °С: 1 – КМК, 35 мкм; 2 – КМК, 5 мкм; 3 – ПАЦ НВ, 35 мкм; 4 – ПАЦ НВ, 5 мкм

Fig. 4. Dependence of filtration of a polymer-clay drilling mud on time at a pressure of 3,5 MPa and a temperature of 140 °С: 1 – CMS, 35 μm; 2 – CMS, 5 μm; 3 – PAC LV, 35 μm; 4 – PAC LV, 5 μm

При формировании буровым раствором сжимаемой глинистой корки объем фильтрата, полученный под высоким давлением, должен быть немного выше объема фильтрата, образующегося в условиях низкого давления. Однако для наших исследуемых систем бурового раствора установлено, что разница объемов фильтратов, полученных при низком и высоком давлении для растворов на основе КМК при температуре 90 °С, примерно в 3 раза больше, чем для бурового раствора на основе ПАЦ НВ и в 1,5 раза больше при температуре 140 °С, что позволяет сделать вывод о плохой сжимаемости глинистой фильтрационной корки при использовании карбоксиметилированного крахмала в составе бурового раствора.

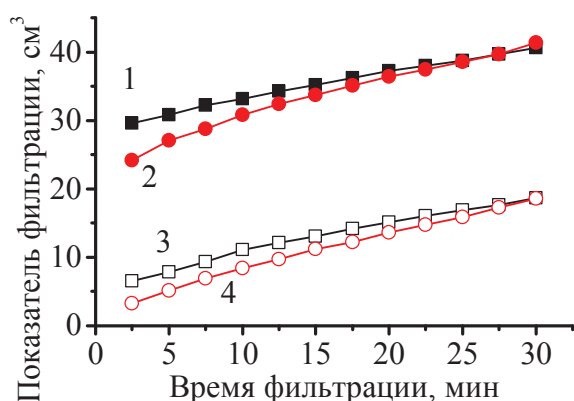
Сравнение фильтрационных свойств биополимерного раствора, содержащего КМК и ПАЦ НВ (рис. 5), показало, что КМК, так же как и в полимер-глинистом буровом растворе, обеспечивает мгновенную фильтрацию немного выше, чем ПАЦ НВ, однако к 25-й минуте оба раствора имеют равные фильтрационные свойства.



**Таблица 3.** Фильтрационные свойства полимер-глинистого бурового раствора (концентрация понизителя фильтрации 1%)

**Table 3.** Filtration properties of polymer-clay drilling mud (concentration of filtering reducer 1%)

Реагент Reagent	Температура, °С Temperature, °C	Диаметр пор диска, мкм Disk pore size, μm	Давление, МПа Pressure, MPa	Показатель фильтрации за 30 мин, см <sup>3</sup> Fluid loss indicator for 30 min, cm <sup>3</sup>	Разница объема фильтрации между 0,7 и 3,5 МПа, см <sup>3</sup> Volume differences of filtration between 0,7 and 3,5 MPa, cm <sup>3</sup>
ПАЦ НВ PAC LV	90	5	0,7	13,2	1,7
			3,5	14,9	
КМК CMS			0,7	8,7	4,9
			3,5	13,6	
ПАЦ НВ PAC LV		35	0,7	21,9	8,9
			3,5	30,8	
КМК CMS	0,7		40,8	25,8	
	3,5		66,6		
ПАЦ НВ PAC LV	140	5	0,7	13,3	11,8
			3,5	25,1	
КМК CMS			0,7	14,7	18,1
			3,5	32,8	



**Рис. 5.** Зависимость фильтрации биополимерного бурового раствора от времени при давлении 3,5 МПа и температуре 90 °С: 1 – КМК, 35 мкм; 2 – ПАЦ НВ, 35 мкм; 3 – КМК, 5 мкм; 4 – ПАЦ НВ, 5 мкм

**Fig. 5.** Dependence of filtration of a biopolymer drilling mud on time at a pressure of 3,5 MPa and a temperature of 90 °C: 1 – CMS, 35 μm; 2 – PAC LV, 35 μm; 3 – CMS, 5 μm; 4 – PAC LV, 5 μm

Известно, что высокая мгновенная фильтрация при сохранении показателя фильтрации на приемлемом уровне способствует увеличению механической скорости бурения [7], поэтому применение КМК в качестве понизителя фильтрации в рецептурах биополимерных растворов оправдано.

#### Исследование реологических свойств буровых растворов

Основной функцией понизителя фильтрации бурового раствора является образование низкопроницаемой фильтрационной корки и минимизация проникновения жидкой фазы в горную породу,

тогда как требуемые реологических параметры в современных рецептурах бурового раствора поддерживаются введением структурообразователей [17]. Поэтому введение понизителя фильтрации не должно вызывать избыточное увеличение вязкости бурового раствора, иначе будет наблюдаться рост дифференциального давления и возможно превышение максимального давления циркуляции до момента достижения фильтрационных потерь в скважине требуемого уровня.

На рис. 6 представлены основные реологические параметры исследуемых систем буровых растворов, содержащих КМК и ПАЦ НВ. Для всех типов растворов в присутствии КМК пластическая вязкость ниже по сравнению с буровыми растворами, содержащими ПАЦ НВ, что положительным образом скажется на скорости разрушения горной породы и, соответственно, скорости бурения в целом. Пластическая вязкость характеризует ту часть сопротивления течению, которая вызвана механическим трением частиц твердой фазы. Увеличение пластической вязкости может означать увеличение процентного содержания твёрдой фазы в растворе, уменьшение размера твёрдых частиц, изменение формы частиц или все вышеперечисленное. Любое увеличение площади поверхности приведет к росту пластической вязкости. Поскольку в исследуемых системах буровых растворов, содержащих ПАЦ НВ и КМК, концентрация твердой фазы поддерживается одинаковой, то можно предположить, что повышенная пластическая вязкость в буровых растворах на основе ПАЦ НВ вызвана линейным строением полимера и большей молекулярной массой по сравнению с КМК, в структуре которого содержится амилопектин с разветвленным строением полимерной цепи, а также меньшей молекулярной массой КМК. Динамическое напряжение сдвига (ДНС), определяющее выносящую способность бурового раствора и, соответственно, отвечающее за качество очистки забоя от разрушаемой горной породы, незначительно отличается в системах полимер-глинистого и минерализованного раствора, содержащего ПАЦ НВ и КМК. ДНС в биополимерном растворе выше для системы с ПАЦ НВ, однако при этом пластическая вязкость фактически равна ДНС, в то время как КМК, обеспечивая значительно меньшую пластическую вязкость, позволяет отрегулировать ДНС при необходимости введением структурообразователя или повышением концентрации КМК.

Статическое напряжение сдвига (СНС) определяет способность удерживать выбуренный шлам в буровом растворе во время остановки циркуляции, например, при спуско-подъемных операциях и т. д. [18]. При высоких значениях СНС из-за резкого снижения гидростатического давления появляются проблемы при пуске насосов, возникают дополнительные энергетические затраты, затрудняется очистка бурового раствора от шлама, увеличивается вероятность гидроразрыва пласта и выброса [6]. Поэтому высокое СНС в полимер-гли-

нистых и минерализованных системах в присутствии КМК может потребовать дополнительной обработки реагентами понизителями вязкости, что увеличит стоимость бурового раствора и промывки скважины в целом. В биополимерном растворе СНС для обоих понизителей фильтрации находится на одном уровне.

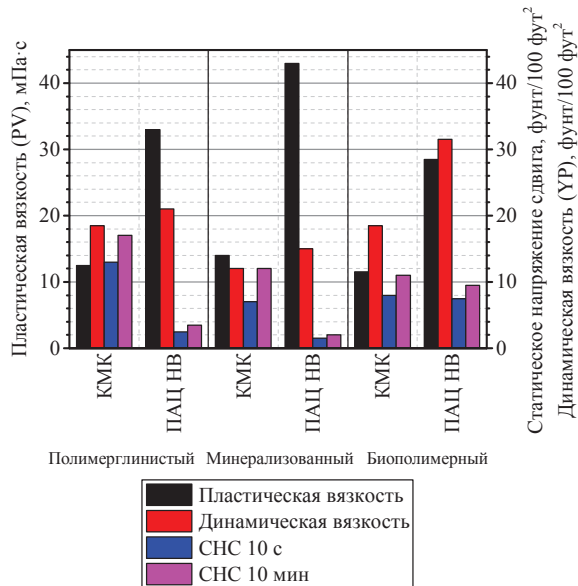


Рис. 6. Реологические свойства буровых растворов, содержащих ПАЦ НВ и КМК (концентрация понизителя фильтрации 1 %)

Fig. 6. Rheological properties of drilling muds containing PAC LV and CMS (concentration of filtering reducer 1 %)

#### Исследование бактерицидной стойкости буровых растворов

Известно, что крахмальные реагенты являются питательной средой для бактерий и грибов [19]. Используемая для приготовления бурового раствора пластовая или техническая вода, как правило, содержит большое количество микроорганизмов, провоцирующих микробиологическую деструкцию, в результате в значительной мере ухудшаются технологические параметры бурового раствора. Для поддержания параметров полисахаридных буровых растворов необходимо проводить периодическую обработку бактерицидными реагентами, большая часть из которых обладает высокой токсичностью, коррозионной активностью или при вводе в буровой раствор меняет его технологические свойства, что повышает сложность поддержания требуемого качества бурового раствора и увеличивает его стоимость [20]. В связи с более высокой степенью замещения и отличиями в строении полимерной цепи карбоксиметильные эфиры целлюлозы обладают большей стойкостью к негативному воздействию бактерий [21, 22] по сравнению с реагентами на основе крахмала. Производители КМК уверяют [22], что термо- и биостойкость карбоксиметилированного крахмала находится на уровне карбоксиметильных эфиров целлюлозы.

Для оценки биостойкости понизителей фильтрации были проведены исследования стабильности фильтрационных и вязкостных свойств полимерглинистого раствора (рис. 7). Для заражения растворов патогенными микроорганизмами использовали ввод шлама, богатого различными микроорганизмами, отобранного на месторождениях Томской области. Измерение структурно-реологических и фильтрационных свойств буровых растворов проводили в течение месяца.

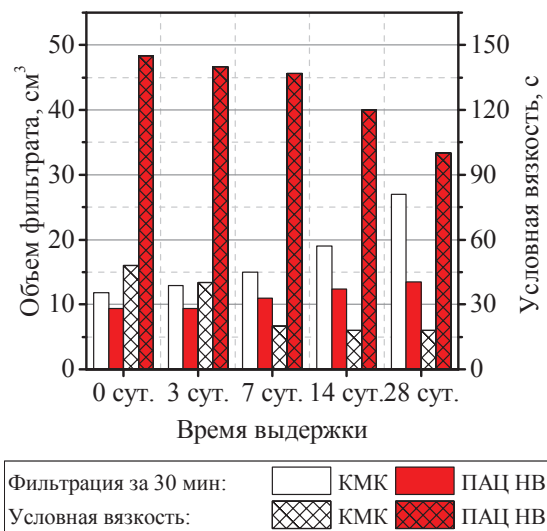


Рис. 7. Реологические свойства буровых растворов, содержащих ПАЦ НВ и КМК (концентрация понизителя фильтрации 1 %)

Fig. 7. Rheological properties of drilling muds containing PAC LV and CMS (concentration of filtering reducer 1 %)

Полученные результаты показывают, что технологические свойства бурового раствора, содержащего КМК, ухудшаются значительно быстрее, по сравнению с раствором, содержащим ПАЦ НВ, уже через 7 суток наблюдается увеличение фильтрации, вспенивание и сильное разжижение бурового раствора. Через 28 суток буровой раствор имеет фильтрационные свойства, близкие к полимерглинистому раствору, не содержащему КМК, что может свидетельствовать о полной деструкции понизителя фильтрации. Таким образом, КМК обладает низкой биостойкостью по сравнению с ПАЦ НВ и не может использоваться без эффективных бактерицидов в составе бурового раствора.

#### Выводы

1. КМК, как понизитель фильтрации, обладает недостаточной эффективностью в минерализованных буровых растворах, при этом в условиях низких температур обеспечивает равную ПАЦ НВ фильтрацию в полимерглинистых и биополимерных растворах.
2. В связи с низкой молекулярной массой и вязкостью реагенты на основе КМК обеспечивают меньшую эффективность по сравнению с ПАЦ НВ по фильтрационным свойствам в горных породах с большой проницаемостью.

3. Фильтрационные корки бурового раствора с использованием ПАЦ НВ обладают сжимаемостью в 1,5–3 раза выше, по сравнению с фильтрационными корками буровых растворов с использованием КМК.
4. При 140 °С наблюдается значительная термическая деструкция КМК в буровом растворе, в отличие от ПАЦ НВ, остающегося стабильным при данных условиях.
5. КМК обладает низкой биостойкостью по сравнению с ПАЦ НВ и не может использоваться без эффективных бактерицидов в составе бурового раствора.
6. Буровые растворы с использованием ПАЦ НВ обладают большей пластической вязкостью и

динамическим напряжением, однако структурно-механические свойства буровых растворов выше при введении КМК.

7. КМК может использоваться как альтернатива ПАЦ НВ в полимер-глинистых и биополимерных буровых растворах при бурении скважин с умеренными забойными температурами в диапазоне 50–90 °С.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках работ по соглашению № 14.578.21.0119 о предоставлении субсидии (Уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI57815X0119) в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные буровые растворы. Эволюция «из грязи в князи» / В.П. Овчинников, Н.А. Аксенова, Л.А. Каменский, В.А. Федоровская // Бурение и нефть. – 2014. – № 12. – С. 24–29.
2. Fink J.K. Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids. – Waltham, MA: Gulf Professional Publ., 2011. – 808 p.
3. Минабаев В.В., Ильин И.А., Пестерев С.В. Эффективность полисахаридных реагентов в буровых растворах различной степени минерализации среды // Бурение и нефть. – 2009. – № 10. – С. 48–50.
4. Investigation of some locally water-soluble natural polymers as circulation loss control agents during oil fields drilling / A.M. Al-sabagh, M.I. Abdou, A.A. Khalil, H.E. Ahmed, A.A. Aboulrous // Egyptian Journal of Petroleum. – 2014. – V. 23. – Iss. 1. – P. 27–34.
5. Mahto V., Sharma V.P. Rheological study of a water based oil well drilling fluid // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2004. – V. 45. – Iss. 1–2. – P. 123–128.
6. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Летопись, 2005. – 664 с.
7. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. – Cambridge, MA: Gulf Professional Publ., 2017. – 729 p.
8. Эффективность реагентов КМЦ и ПАЦ в буровых растворах различной степени минерализации / С.И. Смирнов, О.В. Гальцева, В.Н. Кряжев, С.В. Карлович, С.В. Крюков // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 9. – С. 33–37.
9. Кряжев В.Н., Гальцева О.В., Смирнов С.И. КМЦ и ПАЦ – традиционные стабилизаторы буровых растворов // Нефть. Газ. Новации. – 2016. – № 6. – С. 28–33.
10. Caenn R., Chillingar G.V. Drilling fluids: state of the art // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1996. – V. 14. – Iss. 3–4. – P. 221–230.
11. ГОСТ 33213–2014 (ISO 10414–1:2008). Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе. – М.: Стандартинформ, 2015. – 75 с.
12. ASTM D1439–15. Standard Test Methods for Sodium Carboxymethylcellulose. – West Conshohocken, PA. ASTM International, 2015. URL: www.astm.org (дата обращения 15.12.2017).
13. Optimization of Reaction Conditions for Carboxymethylated Sago Starch / B. Yaacob, M.C.I.M. Amin, K. Hashim, B.A. Bakar // Iranian Polymer Journal. – 2011. – V. 20 (3). – P. 195–204.
14. Ding C., Ju B., Zhang S. Temperature resistance and salt tolerance of starch derivatives containing sulfonate groups // Starch. – 2014. – V. 66. – Iss. 3–4. – P. 369–375.
15. Zhang L.-M. A Review of Starches and their Derivatives for Oilfield Applications in China // Starch. – 2001. – V. 53. – Iss. 9. – P. 401–407.
16. Cellulose Nanocrystals and Polyanionic Cellulose as Additives in Bentonite Water-Based Drilling Fluids: Rheological Modeling and Filtration Mechanisms / M.-C. Li, Q. Wu, K. Song, C.F. de Hoop, S. Lee, Y. Qing, Y. Wu // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2016. – V. 55 (1). – P. 133–143.
17. Xie W., Lecourtier J. Xanthan behaviour in water-based drilling fluids // Polymer Degradation and Stability. – 1992. – V. 38. – Iss. 2. – P. 155–164.
18. Kafashi S., Rasaei M., Karimi G. Effects of sugarcane and polyanionic cellulose on rheological properties of drilling mud: an experimental approach // Egyptian Journal of Petroleum. – 2017. – V. 26. – Iss. 2. – P. 371–374.
19. Progress in starch modification in the last decade / B. Kaur, F. Ariffin, R. Bhat, A.A. Karim // Food Hydrocolloids. – 2012. – V. 26. – Iss. 2. – P. 398–404.
20. Synthesis of Carboxymethyl Starch for increasing drilling mud quality in drilling oil and gas wells / К.М. Минаев, Д.О. Мартынова, А.С. Захаров, Р.Р. Сагитов, А.А. Бер, О.С. Ульянова // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – P. 1–7.
21. Physico-chemical and rheological characterization of water-based mud in the presence of polymers / B. Safi, S. Zarouri, R. Chabane-Chaouache, M. Saidi, A. Benmounah // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2016. – V. 6. – Iss. 2. – P. 185–190.
22. Spychaj T., Wilpiszewska K., Zdanowicz M. Medium and high substituted carboxymethyl starch: synthesis, characterization and application // Starch. – 2012. – V. 65. – Iss. 1–2. – P. 22–33.

Поступила 21.12.2017 г.

#### **Информация об авторах**

**Минаев К.М.**, кандидат химических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Яновский В.А.**, кандидат химических наук, инженер научно-образовательного центра «Перспективные материалы и технологии в недропользовании» Томского государственного университета.

**Минаева Д.О.**, кандидат химических наук, инженер научно-образовательного центра «Перспективные материалы и технологии в недропользовании» Томского государственного университета.

**Захаров А.С.**, магистрант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сагитов Р.Р.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Андропов М.О.**, инженер научно-образовательного центра «Перспективные материалы и технологии в недропользовании» Томского государственного университета.

**Пандей С.К.**, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 622.244.442

## COMPARATIVE RESEARCH OF FILTRATION REDUCERS BASED ON CARBOXYMETHYL ESTERS OF STARCH AND CELLULOSE IN MODERN DRILLING MUD SYSTEMS

**Konstantin M. Minaev<sup>1</sup>,**  
minaevkm@tpu.ru

**Vyacheslav A. Yanovsky<sup>2</sup>,**  
yavatpu@yandex.ru

**Daria O. Minaeva<sup>2</sup>,**  
dashyctrik@gmail.com

**Aleksey S. Zakharov<sup>1</sup>,**  
aszakharov1994@mail.ru

**Rashid R. Sagitov<sup>1</sup>,**  
sagitov\_r@bk.ru

**Mikhail O. Andropov<sup>2</sup>,**  
hudojnick@ya.ru

**Sushil K. Pandey<sup>1</sup>,**  
sushil\_pandey@live.com

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

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

**The importance** of the research is related to the need to reduce the cost of polysaccharide reagents used in drilling fluids, and, therefore, the cost of well construction. This line of research will allow determining the field of application of reagents based on carboxymethyl starch in modern mud formulation.

**The aim** of the research is the prospect of using carboxymethyl starch in modern drilling mud as a filtration reducing agent and an alternative to low-viscosity polyanionic cellulose reagents and evaluating the stability of drilling fluids using these reagents to salt effects, temperatures and biological degradation.

**Objects:** modern systems of polymer-clay, mineralized polymer-clay and biopolymer drilling fluids containing filtering reducers based on carboxymethylated cellulose and starch.

**Research methods:** instrumental methods for determining drilling muds parameters according to State Standard 33213–2014 and guidance document RD 39–00147001–773–2004 (filtration and rheological properties); properties of polysaccharide reagents according to ASTM D1439–15.

**Results.** The authors have carried out the comparative studies of polymer-clay and biopolymer drilling muds using carboxymethyl starch and low viscosity polyanionic cellulose as filtering reducers. It is shown that drilling muds using low viscosity polyanionic cellulose have greater plastic viscosity and dynamic stress, but the structural and mechanical properties of drilling muds are higher when introducing carboxymethyl starch. The latter, as a filtration reducer, has low efficiency in mineralized drilling fluids, while at low temperatures it provides a virtually equal filtration in polymer-clay and biopolymer solutions, in comparison with polyanionic cellulose. It is determined that carboxymethyl starch can be used as an alternative to low viscosity polyanionic cellulose in polymer-clay and biopolymer drilling muds when drilling wells with moderate bottom hole temperatures.

### Key words:

Carboxymethyl starch, carboxymethyl cellulose, polyanionic cellulose, drilling mud, filtration reducer.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the works by the agreement no. 14.578.21.0119 on the grant (Agreement unique identifier: RFMEF157815X0119) to implement the Federal Target Program «Research and development in priority fields of development of science and technology sector in Russia for 2014–2020».

### REFERENCES

1. Ovchinnikov V.P., Aksenova N.A., Kamenski L.A., Fedorovskaya V.A. Polymer drilling muds. Their evolution «from rags to riches». *Burenie i neft*, 2014, no. 12, pp. 24–29. In Rus.
2. Fink J.K. *Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*. Waltham, MA, Gulf Professional Publ., 2011. 808 p.
3. Minibaev V.V., Ilyin I.A., Pesterev S.V. Effectiveness of polysaccharide reagents in drilling solutions of various level of mineralization of medium. *Burenie i neft*, 2010, no. 10, pp. 24–29. In Rus.
4. Alsabagh A.M., Abdou M.I., Khalil A.A., Ahmed H.E., Aboulrous A.A. Investigation of some locally water-soluble natural po-

- ymers as circulation loss control agents during oil fields drilling. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2014, vol. 23, Iss. 1, pp. 27–34.
5. Mahto V., Sharma V.P. Rheological study of a water based oil well drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, vol. 45, Iss. 1–2, pp. 123–128.
  6. Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling muds]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 664 p.
  7. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Cambridge, MA, Gulf Professional Publ., 2017. 729 p.
  8. Smirnov S.I., Galtseva O.V., Kryazhev V.N., Karlovich S.V., Kryukov S.V. The Efficiency of CMC and PAC Reagents in Drill Muds of Different Mineralization Degree. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2016, no. 9, pp. 33–37. In Rus.
  9. Kryazhev V.N., Galtseva O.V., Smirnov S.I. CMC and PAC as Traditional Drill Mud Stabilizers. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2017, no. 6, pp. 28–33. In Rus.
  10. Caenn R., Chillingar G.V. Drilling fluids: state of the art. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, vol. 14, Iss. 3–4, pp. 221–230.
  11. *GOST 33213–2014 (ISO 10414–1:2008). Kontrol parametrov burovyykh rastvorov v promyslovyykh usloviyakh. Rastvory na vodnoy osnove* [State Standard 33213–2014 (ISO 10414–1:2008). Field testing of drilling fluids. Water-based fluid]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 75 p.
  12. *ASTM D1439–15, Standard Test Methods for Sodium Carboxymethylcellulose*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. Available at: [www.astm.org](http://www.astm.org) (accessed 15 December 2017).
  13. Yaacob B., Amin M.C.I.M., Hashim K., Bakar B.A. Optimization of Reaction Conditions for Carboxymethylated Sago Starch. *Iranian Polymer Journal*, 2011, vol. 20 (3), pp. 195–204
  14. Ding C., Ju B., Zhang S. Temperature resistance and salt tolerance of starch derivatives containing sulfonate groups. *Starch*, 2014, vol. 66, Iss. 3–4, pp. 369–375.
  15. Zhang L.-M. A Review of Starches and their Derivatives for Oilfield Applications in China. *Starch*, 2001, vol. 53, Iss. 9, pp. 401–407.
  16. Li M.-C., Wu Q., Song K., De Hoop C.F., Lee S., Qing Y., Wu Y. Cellulose Nanocrystals and Polyanionic Cellulose as Additives in Bentonite Water-Based Drilling Fluids: Rheological Modeling and Filtration Mechanisms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, vol. 55 (1), pp. 133–143.
  17. Xie W., Lecourtier J. Xanthan behaviour in water-based drilling fluids. *Polymer Degradation and Stability*, 1992, vol. 38, Iss. 2, pp. 155–164.
  18. Kafashi S., Rasaei M., Karimi G. Effects of sugarcane and polyanionic cellulose on rheological properties of drilling mud: an experimental approach. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, vol. 26, Iss. 2, pp. 371–374.
  19. Kaur B., Ariffin F., Bhat R., Karim A.A. Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 2012, vol. 26, Iss. 2, pp. 398–404.
  20. Minaev K.M., Martynova D.O., Zakharov A.S., Sagitov R.R., Ber A.A., Ulyanova O.S. Synthesis of Carboxymethyl Starch for increasing drilling mud quality in drilling oil and gas wells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 1–7.
  21. Safi B., Zarouri S., Chabane-Chaouache R., Saidi M., Benmounah A. Physico-chemical and rheological characterization of water-based mud in the presence of polymers. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2016, vol. 6, Iss. 2, pp. 185–190.
  22. Spychaj T., Wilpiszewska K., Zdanowicz M. Medium and high substituted carboxymethyl starch: Synthesis, characterization and application. *Starch*, 2012, vol. 65, Iss. 1–2, pp. 22–33.

Received: 21 December 2017.

#### Information about the authors

**Konstantin M. Minaev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vyacheslav A. Yanovsky**, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk State University.

**Daria O. Minaeva**, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk State University.

**Aleksey S. Zakharov**, master, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Rashid R. Sagitov**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mikhail O. Andropov**, engineer, National Research Tomsk State University.

**Sushil K. Pandey**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК: 622.784:622'17

## ПРИМЕНЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ТЕРМОАКТИВАЦИИ СЕРПЕНТИНОВЫХ МИНЕРАЛОВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

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

**Актуальность.** Серпентиновые минералы, в больших количествах содержащиеся в горнопромышленных отходах, входят в состав вермикулита. Представители серпентиновых материалов – сингулит и вспученный вермикулит – нашли применение в природоохранных технологиях: первый – для детоксикации техногенно загрязненных земель и водных объектов, второй – для почвообразования. Вспученный вермикулит также широко применяется в металлургии, строительстве и других отраслях экономики. Это обуславливает необходимость поисковых работ по разработке технологий и оборудования для получения данных материалов.

**Цель исследования:** создание технологии электрической термоактивации сунгулита в энерготехнологических агрегатах в процессе обжига предварительно обогащенных конгломератов, полученных из горнопромышленных отходов, содержащих сунгулит, вермикулит и оливин-пироксеновые породы.

**Объект:** технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов.

**Методика** исследования базируется на усовершенствовании технологии переработки сунгулитовых конгломератов посредством добавления в технологический процесс процесса термообработки модернизированных электрических модульно-спусковых печей. В конструкцию печей введен модуль с подвижной платформой с электрическим нагревателем.

**Результаты** исследования по вопросам модернизации технологии получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов позволили разработать энерготехнологические агрегаты на базе модифицированных электрических модульно-спусковых печей или печей с вибрационно-подовой платформой с возможностью частичной компенсации затрат энергии на нагрев бесполезной оливин-пироксеновой породы и тем самым уменьшить энергоемкость технологического процесса. Эффективность модернизации подтверждается отсутствием ущерба для качества получаемых материалов. В результате разработана перспективная технология получения продуктов термоактивации серпентиновых минералов из промышленных отходов.

### Ключевые слова:

Серпентиновые минералы, сунгулит, вермикулит, сырьевой конгломерат, термоактивация, тепловая энергия, электрическая печь, дополнительный модуль.

### Введение

Интерес к серпентиновым минералам, которые входят в состав вермикулитовых, магнезитовых, оливинитовых и медно-никелевых пород, содержащихся в больших количествах в горнопромышленных отходах [1], появился в связи с их вяжущими свойствами. При дегидратации серпентинов в интервале температур 670...720 °С происходит образование метасерпентина [2], который и становится серпентиновым цементом [3]. Он не нашел широкого применения, но дальнейшие исследования термоактивированных серпентинов показали, что из них можно получать магнезиально-силикатные реагенты, которые оказались эффективным средством при очистке вод от тяжелых металлов [4]. В работах [1, 5, 6] рассмотрено влияние структуры серпентинов на активность реагента, выявлены оптимальные условия термоактивации, определены характеристики процесса взаимодей-

ствия реагента с растворами тяжелых металлов. Преимуществом магнезиально-силикатного реагента является сочетание в одном продукте положительных свойств этих материалов и возможность существенно снизить стоимость работ за счет использования некондиционного сырья – горнопромышленных отходов [5].

Другим полезным продуктом является вермикулит. Благодаря слоисто-пористой структуре вспученного вермикулита изделия на его основе отличаются высокими термоизоляционными свойствами. Это дает возможность их применения для футеровки электролизерных ванн для плавки алюминия и различных тепловых агрегатов, из него производят огнезащитные плиты и мастики, вермикулит является эффективным теплоизоляционным материалом, пористым наполнителем для легких бетонов, его применяют для звукоизоляции помещений, используют при разливке стали,

для фильтрации воды, в качестве адсорбента дыма и ядовитых газов, как противорадиационный материал [7–9].

Поэтому здесь будут рассмотрены два целевых продукта, которые можно получить – сунгулит, входящий в группу серпентиновых минералов, и вермикулит, в данном случае сопутствующий и очень ценный минерал.

Вспученный вермикулит, помимо применения в строительстве, металлургии, сельском хозяйстве и ряде других отраслей, может использоваться наряду с сунгулитом в природоохранных технологиях. Он участвует в процессах почвообразования, а сунгулит после термоактивации становится эффективным реагентом для детоксикации техногенно загрязненных земель и водных объектов, снижающим геохимическую подвижность тяжелых металлов [5].

#### Технология и оборудование

В исходном сырье основными минералами являются (по массе): сунгулит ~10 %, вермикулит ~13 %, пироксен и оливин ~50 %, остальное – антигорит, окислы железа и другие минералы [9]. Технология их разделения, разработанная в горном институте Кольского научного центра, включает дробление, обогащение в гидросепараторе с отведением слива, сушку и магнитную сепарацию [10]. Получаемая немагнитная фракция (рис. 1) является носителем целевых продуктов: вермикулита ~34 % и сунгулита ~23 %, оливин-пироксеновые породы ~39 %. Размеры частиц определены по выборке из наиболее мелких и наиболее крупных частиц. Выход немагнитной фракции составляет 13 % [9]; именно она является сырьем для разрабатываемой технологии получения указанных продуктов.

Насыпная плотность сунгулита ~1026 кг/м<sup>3</sup>: он на 21 % легче оливинпироксеновой фазы (~1300 кг/м<sup>3</sup>). При термообработке сунгулит дополнительно теряет в весе 15...18 % из-за выхода гидратной воды, а оливинпироксеновая фаза практически не изменяется [10]. Поэтому после термоудара, температурного «томления» и воздушного отделения вспучившегося вермикулита остаточный продукт подвергается вибросегрегации для окончательного удаления оливинпироксеновой фазы. Так может быть получен *сунгулитовый концентрат* с содержанием сунгулита по массе не ниже 90...95 %.

Степень активации сунгулита возрастает с увеличением скорости нагрева, следовательно, оптимальным режимом термообработки будет термоудар и выдержка («томление») при температуре ~600 °C в течение 20...25 минут [1, 5, 11].

Для реализации такого режима со скоростью нагрева 200...240 °C/с могут быть использованы энерготехнологические агрегаты на базе модифицированных электрических модульно-спусковых печей [12] или печей с вибрационно-подовой платформой [13]. Такая печь показана на рис. 2.

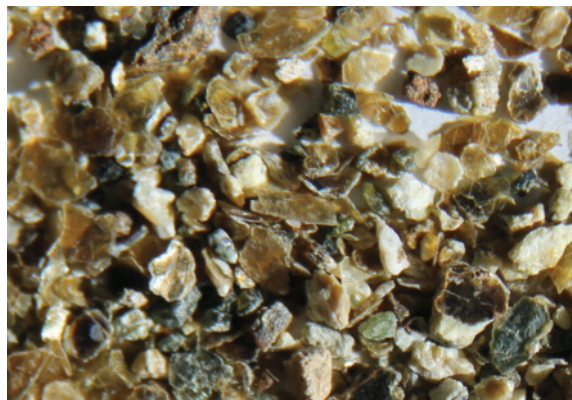


Рис. 1. Сырьевой конгломерат из немагнитной фракции с частицами 0,5...4,0 мм (фотография)

Fig. 1. Raw conglomerate of non-magnetic fraction with particles of 0,5...4,0 mm (photography)

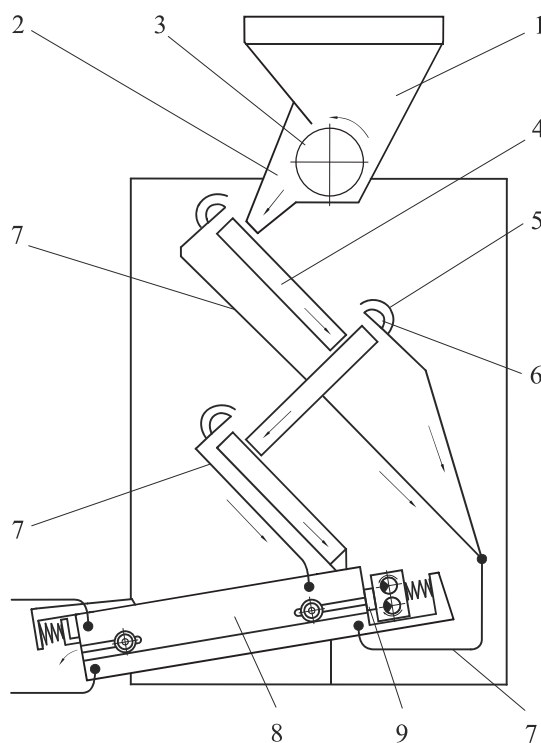


Рис. 2. Модифицированная электрическая модульно-спусковая печь

Fig. 2. Upgraded electric modular-trigger furnaces

Она содержит дозатор сырья – 1 с лотком – 2 и барабаном – 3. В корпусе печи под углом друг к другу расположены электрифицированные модули – 4 с рекуператорами тепловой энергии – 5 и перфорированными всасывателями – 6, которые соединены с трубопроводами – 7. Дополнительный не электрифицированный модуль – 8 расположен под нижней электрифицированным и снабжен в верхней и нижней частях коллекторами. Трубопроводы – 7 соединены с коллекторами в верхней части модуля – 8, а коллекторы в нижней его части соединены трубопроводами с бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором (на



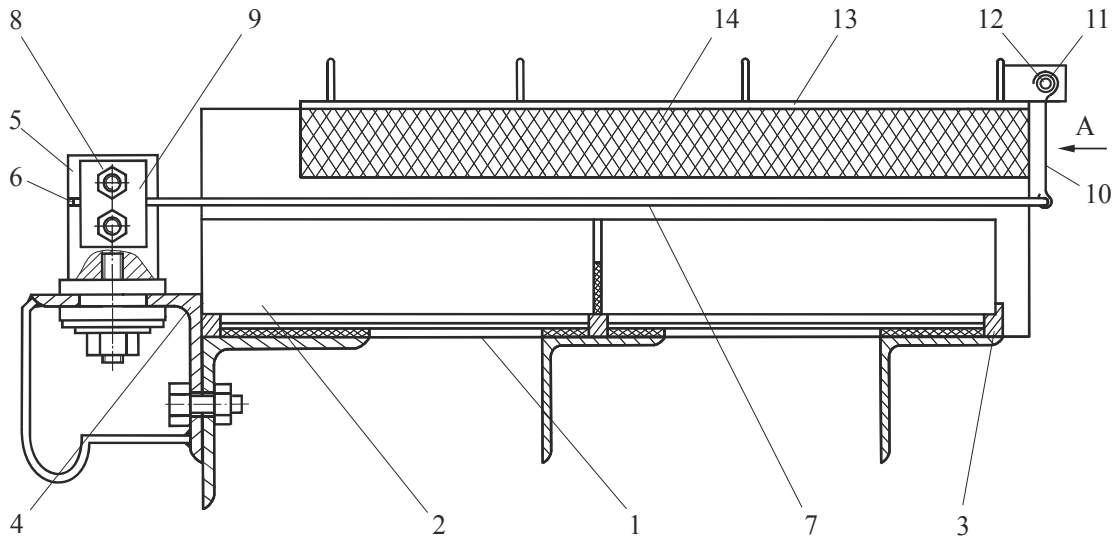


Рис. 3. Электрифицированный модуль печи

Fig. 3. Electrified furnace module

рис. 2 не показаны). В корпусе модуля – 8 размещена подвижная платформа – 9.

На рис. 3 показана новая конструкция модуля с электрическими нагревателями. Модуль имеет раму – 1 с огнеупорным основанием – 2 из шамотного кирпича, которые в наклонном положении модуля удерживаются упором – 3. На панели – 4 установлены головки – 5, которые закреплены на ней шпильками через электроизолирующие прокладки. В пазах – 6 установлены проволочные электрические нагреватели – 7, зафиксированные с помощью резьбовых соединений – 8 и пластин – 9. Нагреватели – 7 в собранном виде располагаются над поверхностью огнеупорного основания с регулируемым зазором. Консоли нагревателей закреплены с люфтом в серьгах – 10, выполненных из полосового нихрома, верхние части ко-

торых через огнеупорные керамические втулки – 11 образуют со стержнем – 12 шарнирное соединение. Для уменьшения тепловых потерь крышка – 13 имеет слой термоизоляции – 14.

Сырьевой концентрат подается дозатором – 1 (рис. 2) по лотку – 2 в верхний модуль – 4. Двигаясь по основаниям электрифицированных модулей, его частицы проходят под раскаленными до  $\sim 720...750^\circ\text{C}$  нагревательными элементами, нагреваются, а вермикулит вспучивается, и пересыпается с одного модуля на другой. Серьги – 10 не ограничивают температурное удлинение нагревателей, удерживая от провисания их консольные части.

Далее термообрабатываемый материал поступает в не электрифицированный модуль – 8 (рис. 2). На рис. 4 он показан в горизонтальном по-

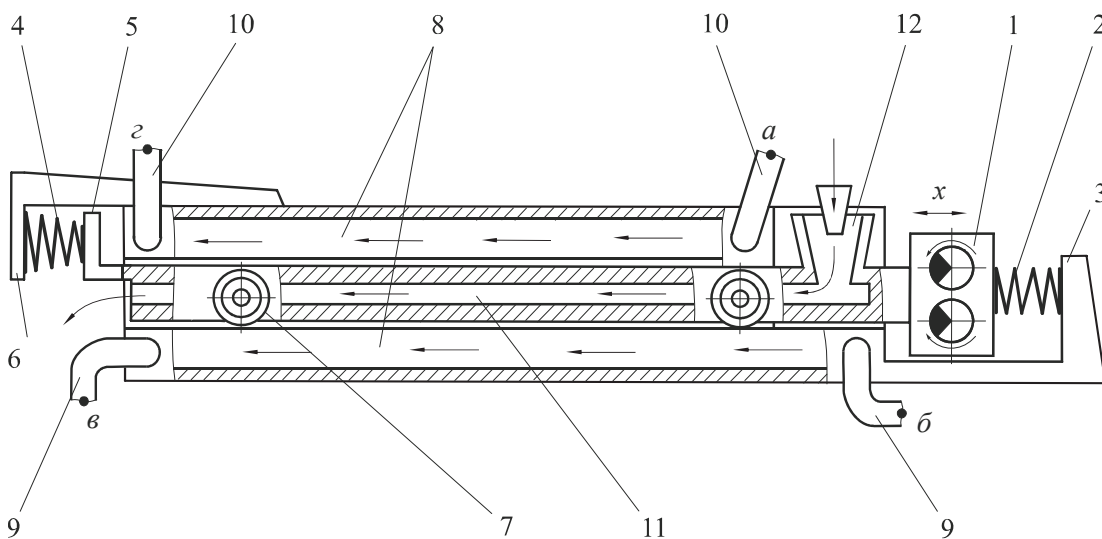


Рис. 4. Не электрифицированный модуль в подвижной платформе

Fig. 4. Nonelectrified furnace module in the movable platform

ложении и содержит низкочастотный возбудитель колебаний – 1, цилиндрические пружины – 2, упирающиеся в выступ – 3 корпуса, и конические пружины – 4, размещенные между упором – 5 и выступом – 6 корпуса.

Подвижная платформа – 9 (рис. 2) имеет ролики – 7 (рис. 4), установленные на осях, выходящих за пределы корпуса модуля через прорезы в его боковых поверхностях. В корпусе, выполненном из стальных листов, имеются верхние и нижние тепловые камеры – 8, утепленные термоизоляционным материалом, образующие пространство, в котором и размещена платформа с возбудителем колебаний. Тепловые камеры сообщены с патрубками – 9, которые в точках *a* и *b* присоединяются через коллекторы к трубопроводам (рис. 1), и с патрубками – 10, которые в точках *v* и *z* присоединены к трубопроводам, сообщенным с бункером-осадителем, снабженным вытяжным вентилятором (на рис. 2 не показаны). Подвижная платформа состоит из стальных листов с теплоизоляционными слоями и имеет плоскую щелевидную камеру – 11, сообщенную с раструбом – 12.

Благодаря роликам, коническим пружинам и возбудителю колебаний платформа совершает несимметричные колебания, при которых максимальное ускорение, направленное вправо  $|\ddot{x}_n|$ , не равно максимальному ускорению, направленному влево  $|\ddot{x}_n|$ :

$$|\ddot{x}_n| > \frac{fG}{m} > |\ddot{x}_n|,$$

где *f* – действительный коэффициент трения; *G* и *m* – вес и масса частицы, находящейся на платформе.

Такие колебания вызывают односторонний транспортный эффект без отрыва частиц [14]. Усиление этой тенденции дает наклон не электрифицированного модуля, а подстраивать скорость движения сырьевого материала в щелевидной камере под производительность печи можно за счет регулирования амплитуды и частоты колебаний.

Особенность процесса термоактивации сунгулита состоит в том, что одновременно с ним нагреву подвергаются оливин-пироксеновая фаза и вермикулит. Поглощаемое им тепло сразу совершает работу вспучивания, а энергия нагрева пироксена и оливина становится вторичным энергоресурсом, который используется при переходе конгломерата в дополнительный не электрифицированный модуль печи.

Сравним скорости нагрева компонентов сырьевого конгломерата по коэффициентам их теплопроводности [15]:

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\rho$  – истинная плотность минералов, кг/м<sup>3</sup>; *c* – их удельная теплоемкость, Дж/кг·°К.

Согласно формуле (1), получим:

• оливин

$$\chi_o = \frac{\lambda_o}{\rho_o c_o} = \frac{5}{2300 \cdot 795} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• пироксен

$$\chi_n = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_n} = \frac{4,380}{2300 \cdot 748} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• сунгулит

$$\chi_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_c} = \frac{2,085}{1760 \cdot 950} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

• вермикулит

$$\chi_b = \frac{\lambda_b}{\rho_b c_b} = \frac{0,060}{200 \cdot 879} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Данные о значениях  $\lambda$ ,  $\rho$  и *c* указанных минералов получены из источника [15].

Среднее значение коэффициента теплопроводности для оливина и пироксена составляет  $\chi_{оп} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ .

Возьмем отношения:

$$\frac{\chi_{оп}}{\chi_b} = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{0,3 \cdot 10^{-6}} \approx 8,7$$

и

$$\frac{\chi_{оп}}{\chi_c} = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-6}} \approx 2,2.$$

Так, ориентировочно мы установили, что оливин-пироксеновая фаза достигнет конечной температуры почти в 9 раз быстрее, чем вермикулит, так как он не вспучивается и не изолирует себя, и примерно в 2,2 раза быстрее, чем сунгулит.

Если для сунгулита необходима конечная температура 600 °С [1, 5], то конструктивные параметры электрифицированных модулей печи и температура их нагревателей должны быть подобраны определенным образом. На входе в дополнительный модуль оливин и пироксен за счет более быстрого нагрева должны быть перегреты до температуры 700...730 °С, а сунгулит – недогретым (~530...560 °С). Вермикулит в своих поверхностных слоях должен иметь температуру 600...700 °С, быть частично недоиспеченным и относительно «холодным» в глубинных слоях (~300 °С). Выравнивание температур и доведение компонентов конгломерата «до кондиции» должно осуществляться уже не за счет внешнего источника энергии (нагревательных элементов), а за счет перераспределения теплоты между самими компонентами внутри дополнительного модуля с подвижной платформой.

В электрифицированных модулях значительная часть выделяющейся теплоты нагревает воздух, который становится теплоносителем с температурой 380...400 °С. Рекуператоры печи – 5 через перфорированные всасыватели – 6 (рис. 2) «собирают» его и по трубопроводам за счет разряжения вытяжного вентилятора направляют в дополнительный модуль. Так создаются условия, практи-

чески исключают теплообмен между компонентами конгломерата, находящегося в щелевом пространстве платформы, и внешней средой. Этому способствует также эффективная термоизоляция из муллитокремнеземистого войлока.

Движение частиц конгломерата за счет несимметричных колебаний и наклона платформы организовано так, что идет сплошной поток без зазоров между ними. Конструктивные (длина и ширина) и динамические (частота и амплитуда) параметры подвижной платформы должны быть такими, чтобы было достаточно времени для завершения теплообменных процессов. В дополнительном модуле тяжелые частицы будут располагаться в нижнем слое, а легкий вермикулит займет верхний слой, не испытывая стесненных условий [16, 17], что дает ему возможность максимально эффективного довспучивания. При этом зерна сунгулита расположатся между пироксеновыми и оливиновыми частицами.

Все это создает максимально благоприятные условия для переноса лучистой энергии от более горячих частиц оливина и пироксена к менее горячим вермикулитовым и сунгулитовым частицам.

Параллельно идет кондуктивный перенос теплоты с горячих поверхностных слоев вермикуловых зерен в глубинные слои, сопровождающийся выравниванием их температур, дегидратацией и довспучиванием.

Таким образом, дополнительный модуль обеспечивает частичную компенсацию затрат энергии на нагрев бесполезной оливин-пироксеновой породы. Именно он позволяет использовать вторичный энергоресурс и, тем самым, уменьшить энергоемкость рассматриваемого технологического процесса.

#### Энергетические аспекты технологии

Определим ориентировочные значения усвоенных тепловых энергий минералами, входящими в состав сырьевого конгломерата с учетом температур их нагрева к моменту выхода из нижнего электрифицированного модуля печи.

Для оливин-пироксеновой фазы:

$$\theta_{\text{оп}} = 0,39c_{\text{оп}} \cdot 0,95mT_{\text{оп}} \quad (2)$$

и сунгулита:

$$\theta_{\text{с}} = 0,23c_{\text{с}} \cdot 0,95 \cdot 0,945mT_{\text{с}}, \quad (3)$$

где 0,39 и  $c_{\text{оп}}$  – средняя удельная теплоемкость оливин-пироксеновой фазы (772 Дж/кг·К) и их весовая доля в конгломерате; 0,23 и  $c_{\text{с}}$  – удельная теплоемкость (950 Дж/кг·К) и весовая доля сунгулита; 0,95 – коэффициент, учитывающий потерю массы минерала за счет выхода физической воды (при 5 % влажности);  $m$  – масса исходного конгломерата (1 кг); 0,945 – коэффициент, учитывающий неполную потерю массы при выходе химически связанной воды (15...18 % [5]) с остаточной весовой долей 4...7 %;  $T_{\text{оп}}$  – примерная средняя температура перегрева оливин-пироксена (715 °С=988 К);  $T_{\text{с}}$  – примерная средняя температура недогретого сунгулита (545 °С=818 К).

Расчет по формулам (2) и (3) дает следующие значения:

$$\theta_{\text{оп}} = 282594 \text{ Дж} \approx 282,6 \text{ кДж};$$

$$\theta_{\text{с}} = 160457 \text{ Дж} \approx 160,5 \text{ кДж}.$$

Энергия теплоусвоения сунгулита при температуре 600 °С (873 К) и полном выходе химически связанной воды будет равна:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{с}} &= 0,23c_{\text{с}} \cdot 0,95 \cdot 0,835mT_{\text{с}} = \\ &= 151313 \text{ Дж} \approx 151,3 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Недостающая теплота, которая будет восполнена энергией оливина и пироксена в дополнительном модуле печи, равна 9,2 кДж.

Теплота, усваиваемая 1 кг вспученного вермикулита с учетом 5-ти процентной влажности при температуре обжига 750 °С (1023 К), определена в работах [12, 18–20] и равна 1209 кДж. При этом накопленная в полностью вспученном минерале остаточная теплота равна 551,9 кДж. Энергия дегидратации – 196,9 кДж, теплота фазового перехода – 258,8 кДж, энергии перегрева водяных и выведения адсорбированных газов соответственно равны 119,1 и 82,37 кДж. С учетом доли вермикулита (0,34), средней температуры к моменту выхода из нижнего электрифицированного модуля печи (450 °С=723 К), а также незавершенности дегидратации и вспучивания (примерно на 50 %) усвоенная тепловая энергия вермикулита составит:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{в}} &= 0,34 \frac{552 + 0,5(197 + 259 + 119 + 82) \cdot 723}{1023} = \\ &= 211,6 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

При полностью завершенной дегидратации и вспучивании усвоенная вермикулитом теплота составит

$$0,34 \cdot 552 = 187,7 \text{ кДж}.$$

Недостающая теплота, которая будет восполнена энергией оливин-пироксеновой фазы в дополнительном модуле печи, будет равна 23,9 кДж.

Перегретая из-за большей теплопроводности (1) оливин-пироксеновая фаза имеет более чем восьмикратный запас энергии кДж (282,6 против 33,1). Учитывая, что средние температуры минералов соотносятся как:

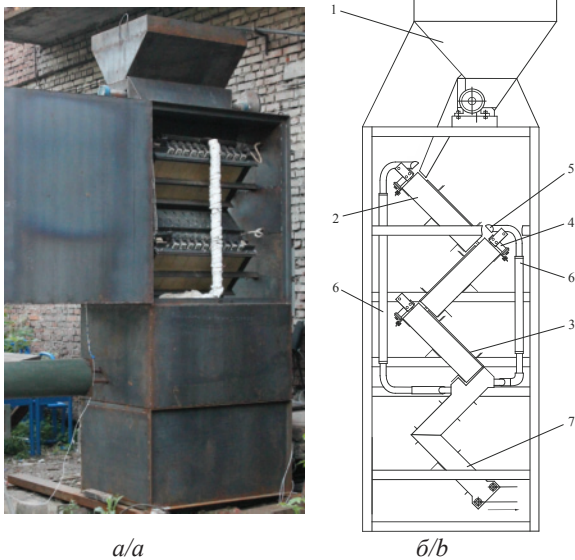
$$\frac{T_{\text{оп ср}}}{T_{\text{с ср}}} = \frac{715}{545} \approx 1,31,$$

$$\frac{T_{\text{оп ср}}}{T_{\text{в ср}}} = \frac{715}{450} \approx 1,59,$$

можно с большой вероятностью прогнозировать, что дополнительный модуль обеспечит выравнивание температур и доведение целевых продуктов «до кондиции».

В подтверждение прогноза приведем экспериментальные данные, полученные при испытаниях электрической модульно-спусковой печи с дополнительным Г-образным модулем, показанной на рис. 5.





**Рис. 5.** Печь с Г-образным модулем: а) опытная печь, б) схема печи: 1 – дозатор, 2 – электромодуль, 3 – термокрышка, 4 – крепежная головка, 5 – рекуператор, 6 – трубопроводы, 7 – дополнительный модуль

**Fig. 5.** Furnace with a Г-shaped module: a) pilot furnace, b) furnace circuit design: 1 is the feed distributor, 2 is the electrical module, 3 is the thermal cover, 4 is the fastening head, 5 is the recuperator, 6 are the pipelines, 7 is the additional module

Эксперименты проводились на флогопит-вермикулитовом сырье с существенным содержанием песка и камней с размерами частиц от 1,5 до 4,5 мм при весовой доле последних около 12...15 %. Поставщиком этой небольшой партии сырья был институт химии и технологии редкоземельных элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской области, который являлся заказчиком опытной печи, показанной на рис. 5. Фракционный состав комбинированного

сырья был указан поставщиком как фракция +2 –4 при измеренной средней насыпной плотности 955,7 кг/м<sup>3</sup> при влажности 7 %.

В процессе опытов определялись зависимости насыпной плотности вспучиваемого материала на входе в дополнительный модуль и на выходе из него от температуры нагревательных элементов. По мере ее увеличения разность насыпных плотностей  $\Delta\rho$  уменьшалась: при температуре 815 °С  $\Delta\rho$  составила 53 кг/м<sup>3</sup>, при  $T=875$  °С  $\Delta\rho$  была равна 34 кг/м<sup>3</sup>, а на предельной минимальной плотности на выходе из дополнительного модуля (227 кг/м<sup>3</sup>) разность плотностей была равна 9 кг/м<sup>3</sup>.

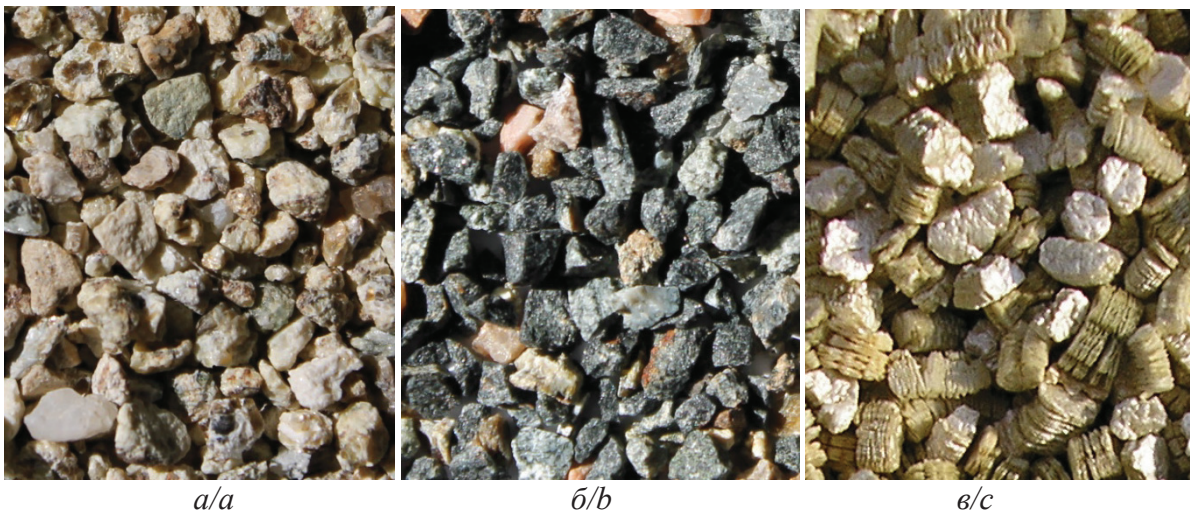
Эффект дополнительного модуля очевиден из приведенных данных, и он может быть интерпретирован так: модуль способен завершить процессы дегидратации вермикулита без ущерба для качества его вспучивания. При этом, за счет более коротких электрифицированных модулей, потребляемая ими энергия снижается на 10...14 %, а производительность, из-за снижения времени движения компонентов в печи, возрастет на 8...10 %.

Здесь энергия, запасенная в песочно-каменистом материале и зернах флогопит-вермикулита в дополнительном модуле, эффективно работает даже в условиях разбегания под действием сил тяжести частиц.

На рис. 6 показаны конечные продукты разрабатываемой технологии: оливин-пироксен-новые породы, сунгулит и вспученный вермикулит.

#### Заключение

Таким образом, технология переработки сунгулитовых конгломератов, созданная в горном институте Кольского научного центра, может быть дополнена их термообработкой в энерготехнологических агрегатах на основе электрических модульно-спусковых печей с дополнительным модулем с подвижной платформой и последующими операциями разделения компонентов сырьевого материала.



**Рис. 6.** Конечные продукты технологии (фотографии): а) оливин-пироксеновые породы, б) сунгулит, в) вермикулит

**Fig. 6.** Ultimate products of the technology (photography): a) olivine-pyroxene rocks, b) sungulite, c) vermiculite



Эффективность модуля с подвижной платформой, встроенного в печь с относительно короткими модулями обжига, должна быть еще выше, так как зерна и частицы конгломерата движутся в нем плотным потоком без образования пустот и зазоров. Поэтому лучистый теплообмен между ними будет происходить максимально интенсивно.

Это новое техническое решение может найти применение на предприятиях горной промышленности при переработке техногенных отходов, а в некоторых случаях электрические печи могут стать основой масштабной технологии термоактивации

серпентиновых минералов и производства вспученного вермикулита. Тем более что применение таких агрегатов для вспучивания вермикулита имеет уже десятилетнюю историю.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках научного проекта С1–11374 (Договор № 1243 ГС 1/21693).*

*Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аморфизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов / И.П. Кременецкая, А.Т. Беляевский, Т.Н. Васильева, О.П. Корытная, Т.И. Макарова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 41–49.
2. О процессе форстеритообразования при нагревании дунита / П.П. Будников, Л.Б. Хорошавин, В.А. Перепелицин и др. // Журнал прикладной химии. – 1967. – № XL. – № 6. – С. 1369–1370.
3. Мчедлов-Петросян О.П. Серпентинитовый цемент // Сборник научных работ по химии и технологии силикатов. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1956. – С. 153–166.
4. Способ очистки воды открытых водоемов от закисления и ионов тяжелых металлов: пат. № 2136608 Рос. Федерация № 98106699/25; заявл. 09.04.98; опубл. 10.09.99, Бюл. № 25. – 3 с.
5. 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.
6. Mucahit Sutçun. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // Ceramics International. – 2015. – V. 41. – P. 2819–2827.
7. Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used / Chief ed. J.E. Kogal. – Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. – 1529 p.
8. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer // Construction and Building Materials. – 2016. – V. 125. – P. 53–62.
9. Выделение вермикулитового концентрата из хвостов обогащения вермикулитовых руд и его использование в жаростойком бетоне / А.Ш. Гершенкоп, М.С. Хохуля, О.Н. Крашенинников, С.В. Бастрыгина // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 57–59.
10. Направления комплексного использования отходов добычи флогопита / С.В. Терещенко, С.А. Алексеева, Е.Д. Рухленко, И.П. Кременецкая, С.В. Бастрыгина, Л.А. Иванова // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли: сборник докладов Всеросс. науч.-техн. конф. В 2 т. – Апатиты; СПб.: Реноме, 2014. – Т. 1. – С. 272–279.
11. Звездин А.В. К технологии получения сунгулитовых и вермикулитовых концентратов из вскрышных пород Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 8. – С. 93–99.
12. Нижегородов А.И. Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига вермикулитовых концентратов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 9. – С. 27–34.
13. Электрическая печь с вибрационной подовой платформой: пат. № 166554 Рос. Федерация № 2015155496/02, заявл. 23.12.2015, опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33. – 2 с.
14. Weaver W. Jr, Timoshenko S.P., Young D.H. Vibration Problems in Engineering. – New York: Wiley-Interscience, 1990. – 624 p.
15. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera et al. – New York: John Wiley & Sons Edition, 2007. – 999 p.
16. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
17. Hombostel C. Construction Materials: Types, Uses, and Applications. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. – 1040 p.
18. Нижегородов А.И. Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. – 2015. – № 10. – С. 22–27.
19. 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.
20. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // Applied Clay Science. – 2017. – V. 146. – P. 7–13.

*Поступила 30.01.2018 г.*

## Информация об авторах

**Нижегородов А.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

**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 Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.784:622'17

## APPLICATION AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF THERMAL ACTIVATION PRODUCTS OF SERPENTINE MINERALS FROM INDUSTRIAL WASTES

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

<sup>1</sup> 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.** Serpentine minerals, in large quantities contained in mining waste, are part of vermiculite. Singulite is a specimen of serpentine materials as well as expanded vermiculite. They both are applied in environmental technologies: the first one is applied for detoxification of technologically contaminated lands and water bodies, the second one is applied for soil formation. Expanded vermiculite is also widely used in metallurgy, construction and other industries. So, it is necessary to search for development of technologies and equipment to obtain these materials.

**The aim** of the research is to develop a technology for electric thermal activation of the sungulite in power technological units while burning pre-enriched conglomerates obtained from mining wastes, which contain sungulite, vermiculite and olivine-pyroxene rocks.

**Methods.** The research method is based on the improvement of the technology for sungulite conglomerates converting by adding into the technological process the heat-treatment of upgraded electric modular-trigger furnaces. A module with a movable platform with an electric heater is fixed in the design of the furnaces.

**Results.** The results of the research based on upgrading the technology for thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes allowed developing the power technological units on the base of upgraded electric modular-trigger furnaces or furnaces with a vibrating bottom platform. This technology makes it possible to compensate partly the costs for heating the useless olivine-pyroxene rock and reduce the power capacity of the technological process. The efficiency of upgrading is proved by deficiency-free obtained materials. As a result, a promising technology for production of thermal activation products of serpentine minerals from industrial wastes is developed.

### Key words:

Serpentine minerals, sungulite, vermiculite, raw conglomerate, thermal activation, heat energy, electric furnace, additional module.

The research was financially supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology within the science project C1–11374 (agreement no. 1243 FC 1/21693).

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the Program of TPU competitiveness enhancement among the leading world research centers.

### REFERENCES

1. Kremenetskaya I.P., Belyaevsky A.T., Vasileva T.N., Korytnaya O.P., Makarova T.I. Amorfizatsiya serpentinovyykh mineralov v tekhnologii polucheniya magnezialno-silikatnogo reagenta dlya immobilizatsii tyazhelykh metallov [Amorphization of serpentine minerals in production of magnesia-silicate reagent for immobilization of heavy metals]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2010, vol. 18, pp. 41–49.
2. Budnikov P.P., Khoroshavin L.B., Perepelitsin V.A. O protsesse forsteritobrazovaniya pri nagrevanii dunita [The process of forsterite formation when heating dunite]. *Journal of Applied Chemistry*, 1967, vol. XL, no. 6, pp. 1369–1370.
3. Mchedlov-Petrosyan O.P. Serpentinovyy tsement [Serpentine cement]. *Sbornik nauchnykh rabot po khimii i tekhnologii selikatoov* [Collection of scientific works on chemistry and technology of silicates]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po stroitelnyim materialam, 1956. pp. 153–166.
4. Makarov V.N., Kremenetskaya I.P. *Sposob ochistki vody otkrytykh vodoemov ot zakisljeniya i ionov tyazhelykh metallov* [Method of water purification from acidification and heavy metal ions in open waters]. Patent RF, no. 2136608, 1999.
5. 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 serpentinerous overburden]. *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2008, vol. 4, pp. 33–40.
6. Mucahit Sutcu. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 2819–2827.
7. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and used*. Chief ed. J.E. Kogal. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. 1529 p.
8. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 53–62.
9. Gershenkop A.Sh., Khokhulya M.S., Krashennnikov O.N., Bastygina S.V. Allocation of vermiculite concentrate from tailings of vermiculite ores and its use in heat-resistant concrete. *Gornyy zhurnal*, 2011, vol. 11, pp. 57–59. In Rus.

10. Tereshchenko S.V., Alekseeva S.A., Ruhlenko E.D., Kremetskaya 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 dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proc. of All-Russian scientific conference. Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli]. Apatity; Saint-Petersburg, Renome Publ., 2014. vol. 1, pp. 272–279.
11. 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.
12. Nizhegorodov A.I. Experience in operating electrical module and trigger different modifications of furnaces for burning vermiculite concentrates. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2014, vol. 9, pp. 27–34. In Rus.
13. Nizhegorodov A.I. *Elektricheskaya pech s vibratsionnoy podovoy platformoy* [Electric furnace with a vibrating floor platform]. Patent RF, no. 166554, 2015.
14. Weaver W. Jr, Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems In Engineering*. New York, Wiley-Interscience, 1990. 624 p.
15. Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons Edition, 2007. 999 p.
16. *Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics]. Chief ed. N.B. Dortmam. Moscow, Nedra Publ., 1984. 455 p.
17. Hombostel C. Vermiculite. *Construction Materials: Types, Uses, and Applications*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991. 1040 p.
18. Nizhegorodov A.I. Elektricheskie modulno-spuskovyye pechi s sistemoy rekuperatsii energii dlya obzhiga vermikulitovykh koncentratov [Electric module and trigger furnace with energy recovery system for burning vermiculite concentrates]. *Novye ogneupory*, 2015, vol. 10, pp. 22–27.
19. 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.
20. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 7–13.

Received: 30 January 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 622.276.054.22

## ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СТЕНДЕ ЦЕПНОГО ПРИВОДА ШТАНГОВОГО СКВАЖИННОГО НАСОСА

Ленков Станислав Николаевич<sup>1</sup>,  
lenkov\_stas@mail.ru

Ямалиев Виль Узбекович<sup>1</sup>,  
vilyzich@yandex.ru

Зубаиров Сибгат Гарифович<sup>1</sup>,  
mkm-ufa@mail.ru

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, г. Уфа, 450062, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность исследования.** В настоящее время применение штанговых скважинных насосных установок является наиболее простым и надежным способом добычи нефти. С 2000 г. получили широкое применение цепные приводы на основе редуцирующего преобразующего механизма, основные преимущества которых: возможность регулирования длины хода и частоты качаний, без увеличения массы и габаритов привода; равномерная скорость движения штанговой колонны на преобладающей части хода; использование редуктора с меньшим передаточным отношением и вращающим моментом; снижение энергетических затрат. Важной составляющей надежной эксплуатации является сбор данных и анализ работы цепных приводов.

**Цель работы:** проведение экспериментов и анализ полученных значений вибрации цепного привода с использованием в качестве тяговой цепи роликковой и зубчатой цепей в определенных диапазонах натяжения.

**Методы исследования:** экспериментальные исследования и анализ влияния натяжения цепи на вибрацию стенда цепного привода штангового скважинного насоса с использованием вибродиагностического комплекса и методов математической статистики.

**Результаты.** Сконструирована экспериментальная установка цепного привода для исследования вынужденных колебаний роликковой и зубчатой цепей с натяжным устройством и без него, а также разработана методика проведения экспериментов вибродиагностических обследований на экспериментальной установке в зависимости от натяжения зубчатой и роликковой цепей. Проведен анализ вибрации стенда цепного привода и построен график влияния натяжения цепи на амплитуду вынужденных колебаний. Проведен спектральный анализ амплитуды вынужденных колебаний стенда цепного привода, и построены гистограммы изменения амплитуды от натяжения цепи.

### Ключевые слова:

Цепной привод, штанговые скважинные насосы, стенд, вибродиагностика, натяжитель цепи, вынужденные колебания, зубчатая цепь, роликковая цепь, натяжение цепи.

### Введение

С каждым годом количество трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья увеличивается. Это связано с переходом многих крупных нефтяных месторождений в позднюю стадию разработки и вводом в разработку скважин с высоким содержанием вязких нефтей, с ростом обводненности скважин и отложением парафина. Данные факторы приводят к снижению срока службы оборудования и увеличению затрат на подъем пластовой жидкости. Одним из путей снижения затрат является использование в составе установок скважинных штанговых насосов безбалансирных приводов на основе редуцирующего преобразующего механизма, получивших название «цепные приводы» [1–6].

Цепные приводы, лишенные всех недостатков по сравнению со станками-качалками, получили широкое распространение на скважинах в ОАО «Татнефть» и ОАО АНК «Башнефть». Анализ статистических данных по характерным отказам узлов цепного привода показал, что наиболее слабым узлом является тяговая цепь. Поэтому исследование и разработка мер по увеличению надежности тяговой цепи, создание и применение методов анализа и контроля технического состояния цепного привода и его узлов являются актуальными [7–21].

Работа цепного привода, как и любого механизма, сопровождается появлением вибрации–вынужденных колебаний, вызванных воздействием сил возбуждения. Совпадение частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний системы приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний и к быстрому разрушению конструкции цепного привода.

Для долговечной и безаварийной работы цепного привода большое значение имеет правильное натяжение цепи. Если цепь натянута слишком сильно, то это существенно снижает ресурс ее работы и может привести к преждевременному выходу из строя деталей и узлов привода. Растяжение цепи приводит к ударам при работе механизма, а при большом ослаблении цепь может выйти из зацепления с нижней звездочкой [1].

Натяжение в приводе регулируется при помощи натяжного винта. Для контроля натяжения цепи предусмотрена система подвеса груза, которая устанавливается на остановленный привод и весом груза оттягивает цепь от вертикального положения на величину натяжения.

Для достижения лучших условий работы тяговой цепи и контроля натяжения предлагается использовать разработанный натяжитель цепи. Луч-



шие условия работы цепи – это обеспечение натяжения в оптимальном диапазоне, что снижает воздействующие силы и возможность проявления резонансных явлений [22, 23].

Для повышения надежности тяговой цепи предлагается установить зубчатую цепь. Зубчатые цепи различаются по конструкции шарниров. В них используют шарниры скольжения, в которых вкладыши, закреплённые в пластинах на всей ширине цепи, контактируют с валиком. Шарнир допускает поворот пластин в две стороны на угол  $\varphi=30^\circ$ . Шарниры качения не имеют валика, их изготавливают с двумя сегментными вкладышами. При взаимном повороте пластин вкладыши не скользят, а перекатываются, что позволяет повысить КПД передачи и долговечность цепи.

#### Объекты исследований

Разработан стенд цепного привода, показанный на рис. 1, на котором проведены вибродиагностические эксперименты с роликовой двухрядной и зубчатой цепями, а также с натяжителем цепи и без него.

Разработка экспериментального стенда с редуцирующим преобразующим механизмом для исследования вынужденных колебаний привода в зависимости от установленной тяговой цепи и ее натяжения выполнялась с учетом следующих условий:

- Геометрический коэффициент подобия:

$$K_L = \frac{l'}{l''} = \frac{3}{1} = 3;$$

где  $l'$  – длина хода цепного привода;  $l''$  – длина хода стенда цепного привода.

- В геометрически подобных системах, двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобный путь за промежуток времени, отношение которых является константой подобия:

$$K_t = \frac{t'}{t''} = \frac{24}{24} = 1;$$

где  $t'$  – время полного хода цепного привода;  $t''$  – время полного хода стенда цепного привода.

- Кинематический коэффициент подобия;

$$K_g = \frac{g'}{g''};$$

где  $g'$  – скорость движения цепи цепного привода;  $g''$  – скорость движения цепи стенда цепного привода.

Так как  $g = \frac{L}{t'}$  кинематический коэффициент можно выразить:

$$K_g = \frac{K_L}{K_t} = \frac{3}{1} = 3.$$

Стенд имеет возможность установить в качестве тяговой цепи роликовую двухрядную цепь или зубчатую цепь, также ведомую звездочку уста-

новить на натяжитель цепи или жестко закрепить на раме, что позволит провести исследования влияния тяговой цепи и ее натяжения на вынужденные колебания установки.

Экспериментальный стенд содержит электродвигатель – 1, соединенный с редуктором – 2 ременной передачей, кассету звездочек – 3, соединенную с редуктором роликовой цепью – 4 и установленной на вал ведущей звездочки – 5, на жесткой раме – 6 с возможностью вращения установлены ведущая – 5 и ведомая – 7 звездочки, охваченные замкнутым гибким звеном – 8, к которому в точке *a* присоединен противовес – 9, с помощью скалки каретки – 10, к противовесу прикреплено гибкое звено – 11, перекинутое через установленный на раме с возможностью вращения направляющий шкив – 12 и передающее движение установочному штоку (грузу) – 13.

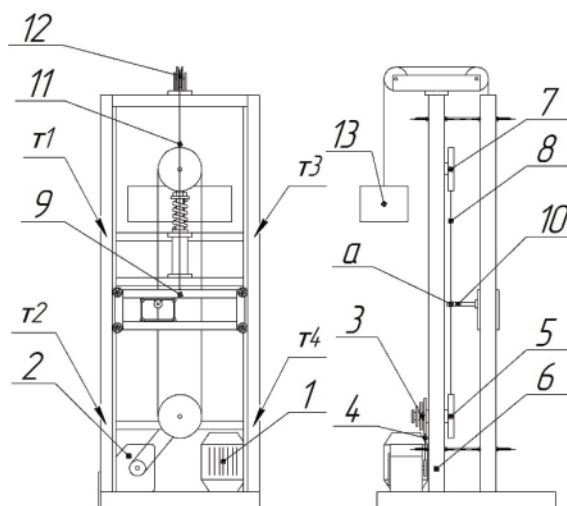


Рис. 1. Стенд цепного привода штангового скважинного насоса

Fig. 1. Stand for chain drive of a sucker-rod pump

#### Методическая часть

Для проведения экспериментальных исследований подготовлено 4 варианта исполнения цепного привода:

- тяговая цепь – зубчатая;
- натяжитель цепи – тяговая цепь (зубчатая цепь);
- тяговая цепь – роликовая;
- натяжитель цепи – тяговая цепь (роликовая цепь).

Одним из основных параметров при проведении экспериментов является натяжение цепи с диапазоном от 10 до 40 мм и шагом 5 мм.

Перед началом исследований были определены места установок вибродатчиков. Так как установить датчики на тяговую цепь невозможно, наиболее выгодные места т1–т4 для установки датчика находятся на раме стенда цепного привода на уровне опор ведомой и ведущей звездочек. Места установки датчика показаны на рис. 1.

Эксперименты проводились методами пассивной вибродиагностики, так как отсутствует специальная система нагружения исследуемой конструкции, а в качестве режима нагружения используется регулярное фоновое воздействие техногенного характера – возбуждающие силы, возникающие в процессе работы привода.

Последовательность проведения экспериментов на стенде для исследования вынужденных колебаний:

- 1) установка тяговой цепи и необходимого натяжения;
- 2) установка датчика на исследуемую точку;
- 3) включение тумблера стенда цепного привода;
- 4) пуск снятия вибрации вибродиагностическим комплексом ДСА-2001;
- 5) сохранение результатов, смена исследуемой точки.

В каждой точке производилось не менее трех экспериментальных измерений, что зависило от повторяемости и стабильности получаемых результатов.

Для измерения вибрации экспериментальной установки использовался вибродиагностический комплекс ДСА-2001 Арמיד с двумя каналами входа данных и с погрешностью измерений 0,05.

## Результаты и обсуждения

В ходе экспериментов были получены значения амплитуд вынужденных колебаний – общий уровень вибрации в измеряемых точках на стенде цепного привода, которые были сведены в таблицу.

Проведенные исследования по общему уровню вибрации показали, что использование зубчатой цепи вместо роликовой приводит к уменьшению амплитуд вынужденных колебаний в среднем на 10 % по всему диапазону натяжения, а при нахождении цепи в оптимальном натяжении снижение может достигать до 20 %. Это объясняется тем, что зубчатые цепи с шарнирами качения не имеют валика, их изготавливают с двумя сегментными вкладышами, которые не скользят при взаимном повороте пластин, а перекатываются.

При включении в конструкцию привода натяжителя цепи наблюдается выравнивание графика изменения амплитуды вынужденных колебаний по всему диапазону натяжения. Использование натяжителя способствует снижению вибрации при натяжении более 25 мм для зубчатой цепи и более 30 мм для роликовой цепи. Графики изменения амплитуды вынужденных колебаний от натяжения показаны на рис. 2.

**Таблица.** Общий уровень вибрации в измеряемых точках на стенде цепного привода с зубчатой и роликовой цепями в зависимости от натяжения цепи

**Table.** Overall vibration level in the measured points on the chain drive stand with a toothed and roller chain, depending on chain tension

V, мм/с		t, мм		Зубчатая цепь/Toothed chain								Зубчатая цепь с натяжителем цепи/Toothed chain with chain tensioner							
				10	15	20	25	30	35	40	10	15	20	25	30	35	40		
t1	x	2,1	1,92	1,23	1,64	1,73	1,65	1,5	2,18	2,06	1,88	1,80	1,64	1,60	1,49				
	y	0,87	0,75	0,69	0,77	0,87	0,85	0,81	0,87	0,79	0,83	0,83	0,82	0,79	0,83				
	z	2,04	1,87	1,79	1,62	1,97	1,94	1,78	2,14	2,06	1,82	1,81	1,74	1,68	1,58				
t2	x	1,43	1,29	1,08	1,04	1,24	1,26	1,29	1,35	1,29	1,16	1,10	0,99	1,01	1,01				
	y	0,89	0,76	0,74	0,79	0,84	0,88	0,87	0,86	0,79	0,85	0,88	0,82	0,83	0,85				
	z	2,23	1,77	1,54	1,26	2,04	1,76	1,75	2,17	2	1,23	1,42	1,67	1,91	1,00				
t3	x	2,06	1,94	1,70	1,65	1,67	1,69	1,49	2,11	2,03	1,83	1,79	1,67	1,60	1,53				
	y	0,95	0,82	0,78	0,89	0,92	0,92	0,88	1,21	1,07	1,01	0,98	1,03	0,91	0,99				
	z	2,01	1,97	1,77	1,78	1,81	1,85	1,91	2,16	2,02	1,70	1,72	1,65	1,67	1,74				
t4	x	1,39	1,25	1,08	1,08	1,2	1,26	1,31	1,52	1,31	1,16	1,10	1,02	1,04	0,97				
	y	0,99	0,82	0,84	0,91	0,92	0,93	0,98	1,17	0,74	0,99	0,97	0,98	0,95	1,05				
	z	1,44	1,4	1,47	1,79	1,66	1,53	1,50	1,64	1,27	1,36	1,41	1,31	1,51	1,35				
V, мм/с		t, мм		Роликовая цепь/Roller chain								Роликовая цепь с натяжителем цепи/Roller chain with chain tensioner							
				10	15	20	25	30	35	40	10	15	20	25	30	35	40		
t1	x	2,24	1,78	1,73	1,60	1,48	1,96	1,83	1,98	1,77	1,89	2,04	2,16	2,06	1,71				
	y	1,45	1,10	1,04	0,97	1,00	1,27	1,20	0,96	0,86	0,9	0,86	0,85	0,93	0,88				
	z	2,19	2,11	2,21	1,89	2,1	2,01	2,05	2,05	1,92	1,8	2,01	1,74	1,92	1,88				
t2	x	1,74	1,30	1,18	1,16	1,10	1,72	1,23	1,21	1,11	1,20	1,48	1,44	1,32	1,09				
	y	1,52	1,14	1,02	0,97	1,00	1,11	1,16	0,97	0,88	0,85	0,83	0,86	0,93	0,91				
	z	1,63	1,75	1,58	1,7	1,75	2,08	1,97	1,98	1,90	1,85	1,37	1,97	1,65	1,48				
t3	x	2,25	1,76	1,71	1,62	1,57	1,88	1,82	2,06	1,72	1,87	2,11	2,12	2,12	1,83				
	y	1,49	1,16	0,94	0,80	1,16	1,28	1,08	1,03	0,96	0,93	0,95	0,99	0,99	1,01				
	z	2,14	1,97	2,12	1,81	2,03	1,99	2,19	2,1	1,88	1,76	1,73	1,94	2,11	1,80				
t4	x	1,65	1,37	1,35	1,17	1,17	1,32	1,32	1,24	1,14	1,21	1,12	1,42	1,42	1,15				
	y	1,35	1,1	1,02	1,03	1,1	1,2	1,13	1,14	0,95	0,94	0,95	0,95	1,06	0,98				
	z	1,82	1,68	1,88	1,57	1,63	1,56	1,58	1,71	1,43	1,36	1,39	1,38	1,42	1,69				

Примечание: t – натяжение цепи, мм; t1–t4 – точки установки датчика в соответствии с рис. 1; x, y, z – плоскость снятия вибрации.

Note: t is the chain tension, mm; t1–t4 are the points of sensor set according to Fig. 1; x, y, z are the planes of vibration deadening.

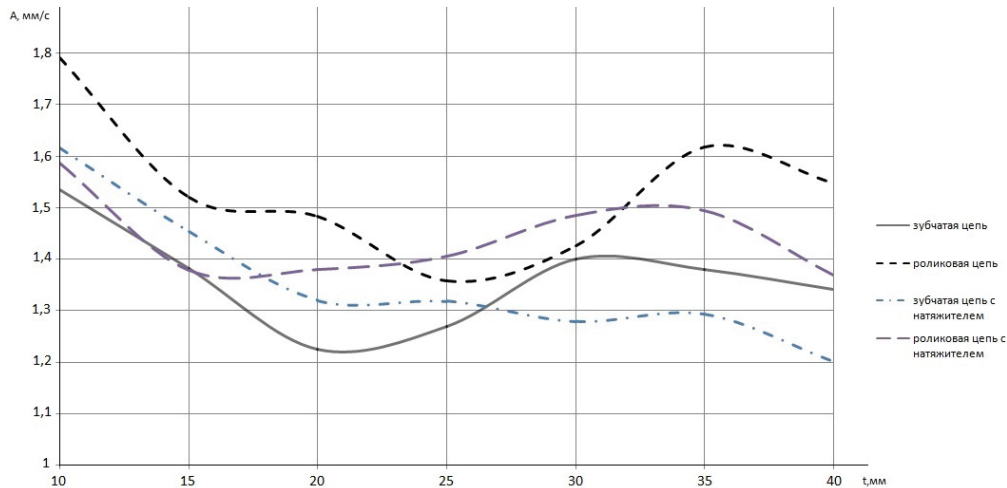


Рис. 2. Влияние натяжения цепи на амплитуду вынужденных колебаний стенда цепного привода

Fig. 2. Influence of chain tension on the amplitude of forced oscillations of the chain drive stand

Из графика, показанного на рис. 2, видно, что зубчатая цепь работает с меньшей амплитудой вынужденных колебаний на всем диапазоне натяжений цепи по сравнению с роликковой цепью.

Рекомендуемое натяжение роликковой цепи для цепного привода штангового скважинного насоса 25 мм [1], при данном натяжении амплитуда вынужденных колебаний на стенде с зубчатой цепью меньше, чем с роликковой цепью, на 8,5 %. Исходя из этого, применение зубчатой цепи в качестве тяговой цепи способствует снижению воздействия возбуждающих сил, тем самым увеличивает срок службы всех узлов цепного привода.

Для получения более достоверных сведений об исследуемом объекте был проведен спектральный анализ вибросигналов. Анализ спектра вибраций в измеряемых точках на стенде цепного привода показал следующие результаты. Выявлены скачки амплитуд вынужденных колебаний на следующих частотах: 5–15; 25; 50; 53,5; 80,5; 100 Гц. Изменение и величина амплитуд вынужденных колебаний на частотах 53,5 и 80,5 Гц незначительны и не превышают 0,01 мм<sup>2</sup>/с, поэтому ими можно пренебречь.

Можно отметить, что частота 5–15 Гц соответствует частоте работы редуктора, тяговой цепи и взаимодействующих с ней узлов; 25 Гц соответствует частоте работы электродвигателя стенда цепного привода и дублируется на частотах 50 и 100 Гц.

Измерение вибрации на стенде производилось в четырех точках и после анализа спектров вибрации для удобства точки 1, 3 и 2, 4 были объединены. Рассмотрение вибрации производилось в верхней и в нижней частях стенда цепного привода. Гистограммы спектров вибрации в измеряемых точках на стенде цепного привода показаны на рис. 3 при частоте 5–15 Гц на оси X.

На построенных гистограммах спектров вибрации не отслеживается явное преимущество ни одного варианта исполнения стенда цепного привода. Это объясняется тем, что каждый узел механизма по отдельности имеет свою частоту колебаний, а воздействующая сила вызывает вынужден-

ные колебания с частотой, зависящей от натяжения цепи, соответственно при близких частотах колебаний могут проявляться резонансные явления и резкое увеличение амплитуды колебаний.

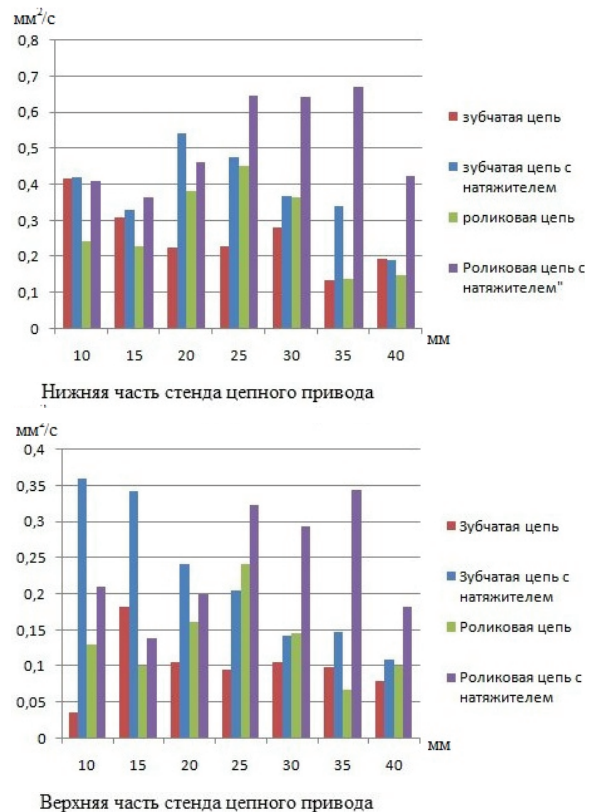


Рис. 3. Гистограмма спектров вибрации стенда цепного привода

Fig. 3. Histogram of vibration spectrum of the chain drive stand

### Выводы

Смоделирован и изготовлен стенд цепного привода для штангового скважинного насоса с натяжителем цепи для вибродиагностических исследований.

Проведены виброизмерения общего уровня вибрации и частотный анализ, которые позволили определить диапазон натяжения цепи при наименьшей вибрации и сравнить вибрацию стенда с роликовой и зубчатой тяговыми цепями.

Исходя из погрешности измерений вибродиагностического комплекса в 0,05, наименьшая вибрация для зубчатой цепи лежит в интервале 18–25 мм, а для роликовой цепи в интервале 22–30 мм.

Анализ проведенных экспериментов показал, что за счет выбора типа тяговой цепи и ее натяжения можно регулировать частоту возбуждающей

силы, тем самым создавать оптимальные условия работы привода, при которых исключается возможность возникновения резонанса системы.

Результаты экспериментов со стендом цепного привода показали, что использование зубчатой цепи приводит к уменьшению вибрации в среднем на 10 % по всему диапазону натяжения. Является целесообразным использование зубчатой цепи в качестве тяговой цепи в цепном приводе штангового скважинного насоса, что позволит за счет снижения общей вибрации увеличить наработку до отката узлов цепного привода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валовский В.М., Валовский К.В. Цепные приводы скважинных штанговых насосов. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2004. – 492 с.
2. Цепной привод скважинного штангового насоса: пат. Рос. Федерация № 2519152; заявл. 25.05.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 10 с.
3. Сираев И.Ф., Габдрахимов М.С. Станок-качалка с цепным приводом с усовершенствованной подвеской // Всероссийская 40-я научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов. – Октябрьский, 2013. – С. 107–111.
4. Швецов М.В., Бикбов Г.Б., Калачёв И.Ф. Цепной привод ШГН для эффективной эксплуатации малодебитных скважин // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 5. – С. 26–27.
5. Использование УСШН с цепными приводами в качестве альтернативы УЭЦН / В.М. Валовский, К.В. Валовский, И.Г. Шамсутдинов, Н.В. Федосеенко, А.А. Сайтов, Р.А. Габдрахманов, С.В. Любецкий // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 7. – С. 52–55.
6. Ямалиев В.У., Ленков С.Н. Анализ работы цепных приводов штанговых скважинных насосов с ОАО АНК «Башнефть» // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 81–85.
7. Ямалиев В.У., Гилязова М.Д., Дулов А.С. Тепловизионный контроль технического состояния УЭЦН // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 3. – С. 271–281.
8. Устройство для оценки технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации: пат. РФ № 2525094; заявл. 05.04.2013, опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. – 8 с.
9. Barkov A.V., Barkova N.A., Mitchell J.S. Condition Assessment and Life Prediction of rolling Element Bearings. P. 1 // Sound and Vibration. – 1995. – V. 29. – № 6. – P. 10–17.
10. Barkov A.V., Barkova N.A., Mitchell J.S. Condition Assessment and Life Prediction of rolling Element Bearings. P. 2 // Sound and Vibration. – 1995. – V. 29. – № 9. – P. 27–31.
11. Badi M.N.M., Breckell T.H. Condition Monitoring of «wet» and «dry» gears using noise, stress wave and acceleration signals // Division of Mechanical and Aeronautical Engineering. – 1996. – V. 7. – P. 208–216.
12. Andrell B.L. Failure analysis of centrifugal pumps // Sound and Vibration. – 1997. – № 09. – P. 20–25.
13. Ямалиев В.У., Салахов Т.Р., Шубин С.С. Применение элементов теории детерминированного хаоса к решению задач техни-

- ческого диагностирования УЭЦН // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2014. – № 4. – С. 174–191.
14. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Sándor Halász // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
15. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок / Р.И. Валиахметов, В.У. Ямалиев, С.С. Шубин, А.В. Алфёров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 159–167.
16. Расчет упруговязкопластического перемещения стенки открытого ствола скважины с учетом сжимаемости горной породы / А.Г. Губайдуллин, А.И. Могучев, В.У. Ямалиев, А.В. Лягов // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 58–60.
17. Yamaliev V.U., Ishemguzhin E.I., Gorshunova L.P. Perspectives for designing fluid cleaners (from patent documentation) // Chemical and petroleum engineering. – 1991. – V. 27. – № 9. – P. 501–505.
18. On the need to take into account vibrations when designing the elements of the drill string / M.F. Zalyaev, V.U. Yamaliev, E.M. Abutalipova, A.N. Avrenyuk // Chemical and petroleum engineering. – 2017. – V. 52. – № 9–10. – P. 647–652.
19. Salakhov T.R., Yamaliev V.U., Dubinsky V. A field-proven methodology for real-time drill bit condition assessment and drilling performance optimization // Society of Petroleum Engineers – SPE. Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition 2008. – М., 2008. – P. 281–288.
20. Гиниятов Д.С., Ямалиев В.У. Определение оптимального угла подъема лопастей на спинке лапы шарошечного долота для горизонтального бурения // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 13–20.
21. Gibbs S.G. Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems // Journal of petroleum technology. – 1963. – V.VII. – P. 769–778.
22. Натяжное устройство цепного привода: пат. Рос. Федерация № 158178; заявл. 28.10.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. – 2 с.
23. Стенд для виброиспытаний компенсатора колебаний установок электроцентробежных насосных / С.Г. Зубаиров, Р.Р. Яхин, Ф.Г. Халимов, И.А. Салихов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 318–322.

Поступила 29.11.2017 г.

#### Информация об авторах

**Ленков С.Н.**, ассистент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Горного факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Ямалиев В.У.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и оборудования нефтегазовых промыслов Горного факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Зубаиров С.Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и конструирования машин Механического факультета Уфимского государственного нефтяного технического университета.



UDC 622.276.054.22

**VIBRODIAGNOSTIC INVESTIGATIONS AT A CHAIN DRIVE STAND OF A SUCKER ROD WELL PUMP**

**Stanislav N. Lenkov<sup>1</sup>,**  
lenkov\_stas@mail.ru

**Vil U. Yamaliev<sup>1</sup>,**  
vilyzich@yandex.ru

**Sibagat G. Zubairov<sup>1</sup>,**  
mkm-ufa@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

**Relevance of the research.** Nowadays application of sucker rod well pumping installations is the simplest and reliable way of oil production. Since 2000 chain drives on the basis of a reducing conversion mechanism have been widely used. Their main advantages are: the ability to adjust the stroke length and frequency control, without increasing the mass and dimensions of the drive; uniform speed of the sucker rod on the prevailing part of the stroke; a reducer with a smaller gear ratio and a torque is used; reduction of energy costs. The important component of reliable operation is data collection and analysis of chain drive operation.

**The aim** of the work is to carry out the experiments and analyze the obtained values of the chain drive vibration using the roller and tooth chains.

**Research methods:** experimental studies and analysis of the influence of chain tension on the vibrodiagnostic complex.

**Results.** The authors have designed the experimental installation of a chain drive for investigation of forced oscillations of a roller and tooth chain with and without a tensioner, toothed and roller chains; analyzed the chain drive vibration and plotted the graph of the influence of chain tension on the amplitude of forced oscillations. Spectral analysis of the forced oscillations amplitude of the chain drive was carried out.

**Key words:**

Chain drive, sucker rod well pumps, stand, vibrodiagnostics, chain tensioner, forced oscillations, rack chain, roller chain, chain tension.

**REFERENCES**

1. Valovskiy V.M., Valovskiy K.V. *Kerogen: tsepnye privody skvazhinnykh shtangovykh nasosov* [Kerogen: chain drives of borehole rod pumps]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2004. 492 p.
2. Ibragimov N.G., Shvetsov M.V., Talypov S.M. *Tsepnoy privod skvazhinnogo shtangovogo nasosa* [Chain drive of the downhole sucker rod pump]. Patent RF, no. 2519152, 2013.
3. Siraev I.F., Gabdrakhimov M.S. Stanok-kachalka s tsepnym privodom s usovershenstvovannoy podveskoy [Rocking machine with chain drive with improved suspension]. *Vserossiyskaya 40-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [All-Russia 40<sup>th</sup> scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students]. Otktyabrskiy, 2013. pp. 107–111.
4. Shvetsov M.V., Bikbov G.B., Kalachev I.F. Chain drive ShGN for efficient operation of low-yield wells. *Exposition oil gas*, 2016, no. 5, pp. 26–27. In Rus.
5. Valovsky V.M., Valovsky K.V., Shamsutdinov I.G., Fedoseenko N.V., Saytov A.A., Gabdrakhmanov R.A., Lyubetsky S.V. Usage of the USShN with chain drives as an alternative to the ESP. *Oil field*, 2005, no. 7, pp. 52–55. In Rus.
6. Yamaliev V.U., Lenkov S.N. Analysis of the operation of chain drives of rod-type well pumps with OAO ANK Bashneft. *Oil and gas business*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 81–85. In Rus.
7. Yamaliev V.U., Gilyazova M.D., Dulov A.S. Thermal imaging control of the technical condition of the ESP. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2015, no. 3, pp. 271–281. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/issues/3\\_2015/ogbus\\_3\\_2015\\_p271-281\\_YamalievVU\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/3_2015/ogbus_3_2015_p271-281_YamalievVU_ru.pdf) (accessed 1 November 2017).
8. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. *Ustroystvo dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov v protsesse ekspluatatsii* [Device for assessing the technical state of the installations of electric centrifugal pumps during operation]. Patent RF no. 2525094, 2013.
9. Barkov A.V., Barkova N.A., Mitchell J.S. Condition Assessment and Life Prediction of rolling Element Bearings. P. 1. *Sound and Vibration*, 1995, vol. 29, no. 6, pp. 10–17.
10. Barkov A.V., Barkova N.A., Mitchell J.S. Condition Assessment and Life Prediction of rolling Element Bearings. P. 2. *Sound and Vibration*, 1995, vol. 29, no. 9, pp. 27–31.
11. Badi M.N.M., Breckell T.H. Condition Monitoring of «wet» and «dry» gears using noise, stress wave and acceleration signals. *Division of Mechanical and Aeronautical Engineering*, 1996, vol. 7, pp. 208–216.
12. Andrell B.L. Failure analysis of centrifugal pumps. *Sound and Vibration*, 1997, no. 9, pp. 20–25.
13. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. Application of the elements of the theory of deterministic chaos to solving problems of technical diagnostics of the ESP. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2014, no. 4, pp. 174–191. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/issues/4\\_2014/ogbus\\_4\\_2014\\_p174-191\\_YamalievVU\\_ru.pdf](http://ogbus.ru/issues/4_2014/ogbus_4_2014_p174-191_YamalievVU_ru.pdf) (accessed 1 November 2017).
14. Glazyrin A.S., Kladiyev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz Sandor. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
15. Valiakhmetov R.I., Yamaliev V.U., Shubin S.S., Alferov A.V. Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 159–167. In Rus.
16. Gubaidullin A.G., Moguchev A.I., Yamaliev V.U., Lyagov A.V. Calculation of open hole wall elastoviscoplastic displacement in

- case of compressible rock conditions. *Oil field*, 2018, no. 2, pp. 58–60. In Rus.
17. Yamaliev V.U., Ishemguzhin E.I., Gorshunova L.P. Perspectives for designing fluid cleaners (from patent documentation). *Chemical and Petroleum Engineering*, 1991, vol. 27, no. 9, pp. 501–505.
  18. Zalyaev M.F., Yamaliev V.U., Abutalipova E.M., Avrenyuk A.N. On the need to take into account vibrations when designing the elements of the drill string. *Chemical And Petroleum Engineering*, 2017, vol. 52, no. 9–10, pp. 647–652.
  19. Salakhov T.R., Yamaliev V.U., Dubinsky V. A field-proven methodology for real-time drill bit condition assessment and drilling performance optimization. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil And Gas Technical Conference And Exhibition 2008*. Moscow, 2008. pp. 281–288.
  20. Giniyatov D.S., Yamaliev V.U. Determination of the optimal angle of blade lift on the back of the paw of the roller cutter for horizontal drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university. Geo assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 13–20. In Rus.
  21. Gibbs S.G. Predicting the behavior of sucker-rod pumping systems. *Journal of petroleum technology*, 1963, vol. VII, pp. 769–778.
  22. Yamaliev V.U., Lenkov S.N. *Natyazhnoe ustroystvo tsepnogo privoda* [Chain drive tensioner]. Patent RF, no. 158178, 2014.
  23. Zubairov S.G., Yakhin R.R., Khalimov F.G., Salikhov I.A. Stand for vibration tests of the compensator of vibrations of installations of electric centrifugal pumping. *Electronic scientific journal «Oil and gas business»*, 2011, no. 3, pp. 318–322. In Rus. Available at: [http://ogbus.ru/authors/Zubairov/Zubairov\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Zubairov/Zubairov_1.pdf) (accessed 1 November 2017).

*Received: 29 November 2017.*

#### Information about the authors

**Stanislav N. Lenkov**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

**Vil U. Yamaliev**, Dr. Sc., professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.

**Sibagat G. Zubairov**, Dr. Sc., professor, head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.643:51.74:004.94

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ

Мамонова Татьяна Егоровна<sup>1</sup>,

stepte@tpu.ru

Сидорова Анастасия Александровна<sup>1</sup>,

sidorova@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью увеличения ресурса работы датчиков давления при эксплуатации технологических (нефте-, газо-) трубопроводов. В настоящее время все предприятия транспортировки нефтепродуктов при разработке технологических процессов применяют различные виды средств измерения параметров продукта и трубопровода, что позволяет в полной мере создавать автоматизированное производство. При проектировании таких производств большое внимание уделяется выбору датчиков с целью получения достоверных по точностным характеристикам данных и продления их срока службы, связанного с надежной эксплуатацией конструкций и агрегатов трубы, на которой они установлены. При этом необходимо учитывать влияние параметров трубы и перекачиваемой жидкости на динамику чувствительного элемента датчика, так как это позволит обеспечить не только необходимую точность, но и повысит надежность конструкции «датчик давления – трубопровод» и, как следствие, надежность системы в целом. Поломка оборудования или неверная диагностика может привести к остановке процесса перекачивания нефтепродуктов и, как следствие, к более серьезным экономическим и экологическим проблемам. Таким образом, задача исследования адекватной математической модели, связывающей динамику чувствительного элемента датчика давления и параметры нефтепровода, в настоящее время является актуальной.

**Цель исследования:** определить влияние параметров нефтепровода, перекачиваемой жидкости, а также давления в трубе на прогиб чувствительного элемента датчика давления, расположенного на боковой стенке трубы.

**Объект:** математическая модель взаимодействия трубопровода перекачки жидкости и датчика давления при его расположении на боковой стенке трубы.

**Методы:** имитационное моделирование, анализ и оценка влияния параметров трубопровода и перекачиваемой жидкости на прогиб чувствительного элемента датчика.

**Результаты.** Исследование влияния параметров транспортируемой жидкости и датчика давления на изменение прогиба чувствительного элемента рассматриваемого прибора показало, что при выборе датчиков давления необходимо учитывать такие параметры датчика, как коэффициент Пуассона и толщина чувствительного элемента. Также установлено, что наибольшее влияние на прогиб чувствительного элемента датчика оказывает плотность перекачиваемой жидкости. С использованием имитационного приложения Simulink программы MatLab был исследован наиболее распространенный датчик давления DMD 331-A-S-AX. Установлено, что при повышении измеряемого давления в трубе амплитуда колебания чувствительного элемента составляет 3,5 мм и время колебания 180 секунд при максимально допустимом давлении 9,8 МПа. При увеличении давления процесс становится расходящимся, что сигнализирует о порыве мембраны.

### Ключевые слова:

Математическая модель, датчик давления, трубопровод, параметры трубопровода, имитационное моделирование, чувствительный элемент датчика.

### Введение

Давление, наряду с такими параметрами как температура перекачиваемой жидкости, её расход и скорость, является крайне важным параметром систем контроля и управления нефтепроводами. В состав датчика давления входят такие элементы, как устройства вывода информационного сигнала, схема вторичной обработки сигнала, корпусные детали, первичный преобразователь давления, в состав которого входит чувствительный элемент, являющийся приёмником давления в трубе. Изменение прогиба чувствительного элемента может привести к поломке устройства измерения давления, что приведёт к неправильной работе системы управления процессом перекачки. Моделирование системы «датчик давления – трубопровод» позволит на уровне проектирования определить диапазон изменения прогиба чувствительного элемента датчика при различных внешних параметрах.

Получением математической модели, позволяющей исследовать характер течения жидкости в трубе и влияние данного характера на датчики, ранее занимались авторы работ [1, 2]. В данных источниках рассмотрены задачи динамики упругого элемента конструкции, которая представляет собой динамическую модель механической системы «трубопровод – датчик давления», а также математические модели механической системы «трубопровод – датчик давления». Здесь получены уравнения, связывающие изменение давления на одном из контуров трубопровода с деформацией упругого элемента датчика. В [3] были предложены математические модели механической системы «трубопровод – датчик давления», в которых для описания давления рабочей среды в трубопроводе применяется линейная теория, а для исследования динамики упругого элемента датчика – линейная и нелинейные теории. Было дано решение аэроги-

родинамической части задачи, основанное на методах теории функций комплексного переменного. Было получено уравнение, связывающее между собой давление рабочей среды на входе в трубопровод (на выходе из камеры сгорания двигателя) и деформацию упругого элемента датчика, расположенного на другом конце трубопровода. Исследования динамики и динамической устойчивости упругих или вязкоупругих элементов датчиков давления, являющихся составной частью конструкции, представляющей собой модель механической системы «трубопровод – датчик давления», были представлены в [4]. Исследования проводились для различных способов расположения датчика давления на стенке плоского или осесимметричного трубопровода конечной или бесконечной длины, с учетом взаимодействия элементов с рабочей средой (жидкостью или газом) и теплового воздействия на них. В статьях [5, 6] приведено математическое описание устройства измерения давления при его использовании в алгоритмах определения утечек из трубопроводов.

Что касается зарубежных изданий, то различные вопросы математического и имитационного моделирования систем «датчик давления – трубопровод» отражены в работах [7–16]. В основном представленные модели используются для их дальнейшего применения в сложных системах диагностики нефтепроводов и в системах определения утечек.

Однако в источниках, представленных в списке литературы, проводится исследование полученной математической модели для определения влияния параметров трубопровода, жидкости и самого устройства измерения на износостойкость датчика. Это применимо в вопросах подбора датчиков давления на стадии проектирования трубопровода и систем его диагностики, в том числе систем определения прорывов нефтепродуктопроводов.

#### Моделирование системы «датчик давления – трубопровод»

В работе [17] была получена формула, отображающая зависимость прогиба чувствительного элемента от параметров трубопровода, перекачиваемой жидкости и свойств датчика для случая, когда устройство измерения расположено на боковой стенке трубопровода (рис. 1). Данная формула имеет следующий вид:

$$\left( \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} - \frac{x_0\rho}{\pi} + \rho_m h \right) \ddot{\omega} + \beta\dot{\omega} + \frac{Eh}{1-\mu^2} \omega = P_0(y) \cos\left(\frac{\pi}{y_0}\right) - \frac{1+y_0}{y_0} P_0(y), \quad (1)$$

где  $\omega$  – прогиб чувствительного элемента датчика, м;  $P_0$  – распределенная внешняя нагрузка, действующая на упругий элемент, Па;  $y_0$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $x_0$  – длина трубопровода, м;  $\rho_m$  – плотность мембраны, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – модуль Юнга, Па;  $h$  – толщина мембраны, мм – коэф-

фициент Пуассона (отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению);  $\beta$  – коэффициент демпфирования.

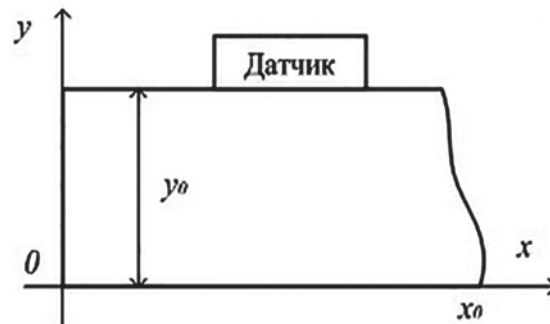


Рис. 1. Схема размещения датчика на трубопроводе

Fig. 1. Scheme of placing a sensor on the pipeline

В формуле (1) отображена связь изменения давления рабочей среды в трубопроводе перекачки нефтепродуктов и прогиб упругого элемента датчика давления. В работе [18] автором проведено исследование математических моделей при расположении устройства на торцевой стороне трубы. При этом модель проверена на адекватность и проведён факторный эксперимент.

Известно, что изготовители датчиков давления в зависимости от контактируемой среды конструируют датчики с различными параметрами. В табл. 1 приведены наиболее распространённые параметры трубопровода и перекачиваемой жидкости, взятые из [19–22]. При определении значений параметров полученной зависимости необходимо учитывать следующее: коэффициент Пуассона зависит не от размеров тела, а от природы материала; плотность нефти зависит от температуры, поддерживаемой в трубопроводе, и от свойств добытого ископаемого на определённом месторождении.

Для проведения исследований в приложении для имитационного моделирования Simulink программной среды MatLab была построена модель, обобщённая схема которой приведена на рис. 2.

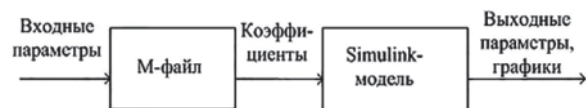


Рис. 2. Обобщённая схема моделирования системы «датчик давления – трубопровод»

Fig. 2. Generalized scheme of modeling the «pressure sensor – pipeline» system

При проведении имитационного моделирования выбраны наиболее распространённые параметры датчика и перекачиваемой жидкости, используемые в нефтегазопромышленности, приведённые в табл. 2. При этом сделано предположение, что материалом чувствительного элемента датчика (мембраны) служит нержавеющая сталь 316L. Толщина мембраны взята как среднее значение по всей её длине.



**Таблица 1.** Параметры нефтепроводов и перекачиваемой по ним жидкости

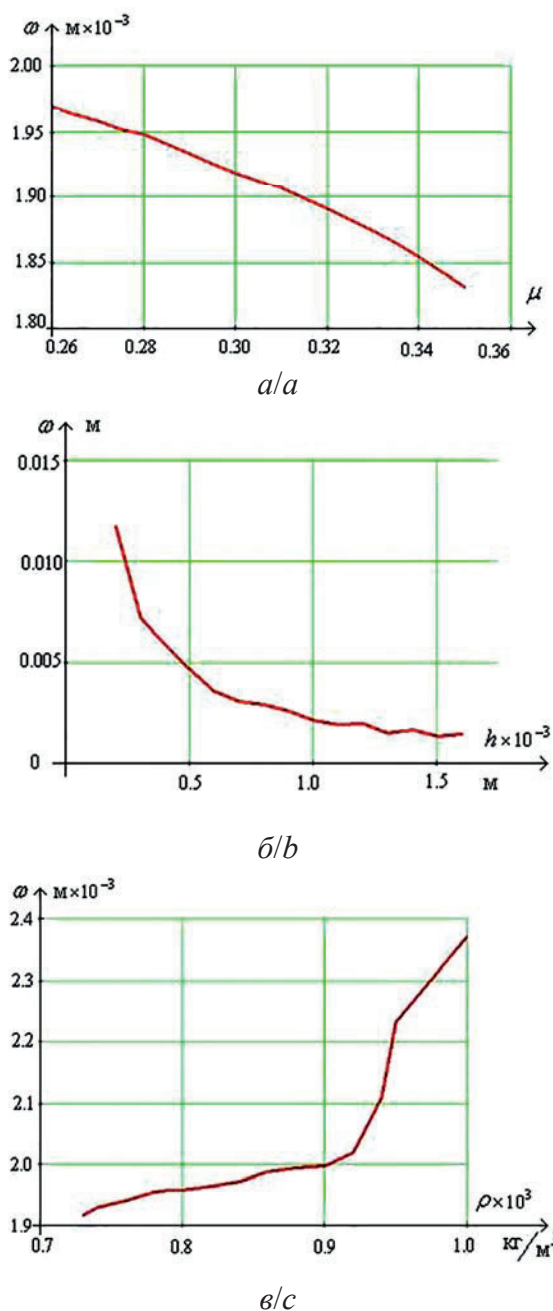
**Table 1.** Parameters of oil pipelines and liquid pumped over them

Название параметра Parameter	Диапазон изменения параметра Range of parameter change	
Толщина чувствительного элемента $h$ , мм Thickness of a sensitive element $h$ , mm	(0,2...1,6)	
Плотность мембраны датчика $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup> Sensor membrane density $\rho_m$ , kg/m <sup>3</sup>	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(7400...7800)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(7700...8100)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	(2330...3050)
Модуль упругости элементов датчика (модуль Юнга) $E$ , ГПа Module of elasticity of sensor elements (Jung's module) $E$ , GPa	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(78...190)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(193...200)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	(109...131)
Коэффициент Пуассона $\mu$ Poisson's constant $\mu$	пьезокерамические элементы piezoceramics elements	(0,29...0,35)
	элементы из нержавеющей стали stainless steel elements	(0,27...0,30)
	элементы из монокристаллического кремния single-crystal silicon elements	0,266
Плотность нефти $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Oil density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	(730...1040)	

**Таблица 2.** Параметры чувствительного элемента датчика давления, трубопровода и перекачиваемой жидкости

**Table 2.** Parameters of a sensitive element of a pressure sensor, pipeline and pumped-over liquid

Название параметра Parameter	Значение параметра Parameter value
Коэффициент Пуассона $\mu$ Poisson's constant $\mu$	0,27
Модуль Юнга $E$ , ГПа Jung's module $E$ , GPa	200
Плотность мембраны $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup> Membrane density $\rho_m$ , kg/m <sup>3</sup>	8000
Длина трубы $x_0$ Pipeline length $x_0$	100
Толщина мембраны $h$ , м Membrane thickness $h$ , m	0,0012
Коэффициент демпфирования $\beta$ Damping ratio $\beta$	0,3
Диаметр трубопровода $y_0$ , м Pipeline diameter $y_0$ , m	0,5
Плотность нефти $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Oil density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	800



**Рис. 3.** График зависимости прогиба чувствительного элемента  $\omega$  от: а) коэффициента Пуассона  $\mu$ ; б) толщины чувствительного элемента  $h$ ; в) плотности перекачиваемой жидкости  $\rho$

**Fig. 3.** Dependence schedule of sensitive element deflection  $\omega$  on: a) Poisson's constant  $\mu$ ; b) thickness of a sensitive element  $h$ ; c) density of the pumped-over liquid  $\rho$

В соответствии с [23] выбрано рабочее давление 2 МПа. Исследование прогиба чувствительного элемента датчика давления проводилось для наиболее изменяемых параметров: коэффициент Пуассона  $\mu$ , толщина чувствительного элемента  $h$  и плотность нефти  $\rho$ . Диапазон значений параметров мембраны равен диапазону возможных значений для материала чувствительного элемента.

Плотность нефти изменяется в зависимости от месторождений мира [21]. Графические зависимости прогиба чувствительного элемента от указанных параметров были получены с использованием приложения Simulink программы MatLab и приведены на рис. 3.

При моделировании в качестве неизменяемых параметров выбраны: для графика (а) – толщины чувствительного элемента  $h$  и плотность перекачиваемой жидкости  $\rho$ ; для графика (б) – коэффициента Пуассона  $\mu$  и плотности перекачиваемой жидкости  $\rho$ ; для графика (в) – коэффициента Пуассона  $\mu$  и толщины чувствительного элемента  $h$ .

С увеличением коэффициента Пуассона  $\mu$ , характеризующего упругие свойства материала диафрагмы датчика, происходит уменьшение прогиба чувствительного элемента. При этом коэффициент  $\mu$  изменяется в диапазоне значений для нержавеющей стали. Функция зависимости прогиба упругого элемента датчика от толщины чувствительного элемента  $h$  имеет гиперболический характер: с увеличением данной величины отклонение мембраны понижается. Еще один из исследуемых параметров – плотность нефти  $\rho$ . С ростом данного параметра происходит увеличение прогиба чувствительного элемента, но характер данной зависимости для исследуемых моделей различен.

Таким образом, в соответствии с проведенным имитационным методом оценки адекватности можно сделать вывод, что модель является адекватной, так как прогиб упругого элемента выбранного датчика давления лежит в диапазоне 1–10 мм [24].

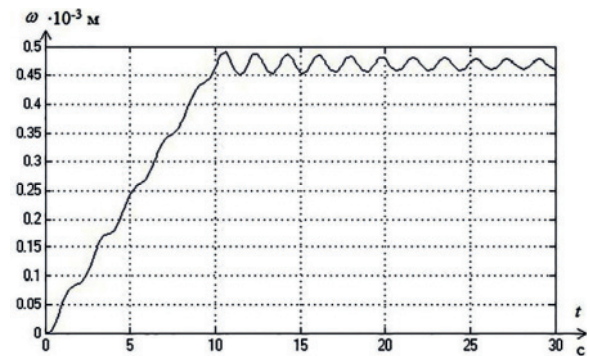
Исследуем влияние давления в нефтепроводе на прогиб чувствительного элемента датчика. Был выбран датчик давления DMD 331-A-S-AX, в котором в качестве чувствительного элемента применяется ёмкостной элемент, данные которого приведены в табл. 1. Дополнительные параметры для проведения моделирования взяты из [24, 25] и приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Дополнительные параметры для моделирования

**Table 3.** Additional parameters for modeling

Название параметра Parameter	Значение Value
Верхний предел измерения давления датчика Top limit of measuring sensor pressure	40 Мпа/MPa
Материал трубопровода Pipeline material	сталь 14ГБ-Ш 14GB-Sh steel
Класс прочности Strength class	50–60
Назначение трубопровода Pipeline function	строительства газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктов в северном и обычном исполнении construction of gas pipelines, oil pipelines and oil products in northern and usual execution
Рабочее давление Working pressure	5,4–9,8 МПа/MPa

Моделирование проведено для различных значений давления в трубопроводе из диапазона 5,4–9,8 МПа. Остальные параметры, входящие в модель, неизменны и представлены в табл. 2. На рис. 4 приведён график, отображающий прогиб чувствительного элемента при нарастающем изменении давления в трубе.



**Рис. 4.** Прогиб чувствительного элемента в зависимости от давления 5,4 МПа

**Fig. 4.** Deflection of a sensitive element depending on pressure of 5,4 MPa

Из указанного графика можно заключить, что изменение отклонения мембраны имеет нарастающий характер с дальнейшим колебанием в пределах допустимых значений. Время затухания составляет 10 с, конечное значение отклонения мембраны равно  $0,47 \cdot 10^{-3}$  м.

На рис. 5 приведен график, отображающий изменение амплитуды колебания чувствительного элемента датчика и время его затухания в зависимости от измеряемого давления.

Результаты проведенного имитационного моделирования зависимостей, отображающих изменение прогиба чувствительного элемента датчика давления от параметров трубы и перекачиваемой жидкости, показали, что с увеличением давления в трубопроводе возрастает отклонение чувствительного элемента датчика давления и увеличивается время переходного процесса в нём. При дальнейшем повышении давления в нефтепродуктопроводе прогиб чувствительного элемента выходит из допустимого диапазона 1–10 мм [23], что физически означает прорыв мембраны датчика давления.

#### Заключение

На прогиб чувствительного элемента датчика давления при его расположении на боковой стороне трубы оказывают влияние такие параметры, как плотность жидкости, коэффициент Пуассона, характеризующий материал изготовления мембраны датчика, и толщина чувствительного элемента датчика. Однако по представленным графикам выявлено, что наибольшее влияние на величину прогиба чувствительного элемента производит плотность жидкости, транспортируемой в трубопроводе.

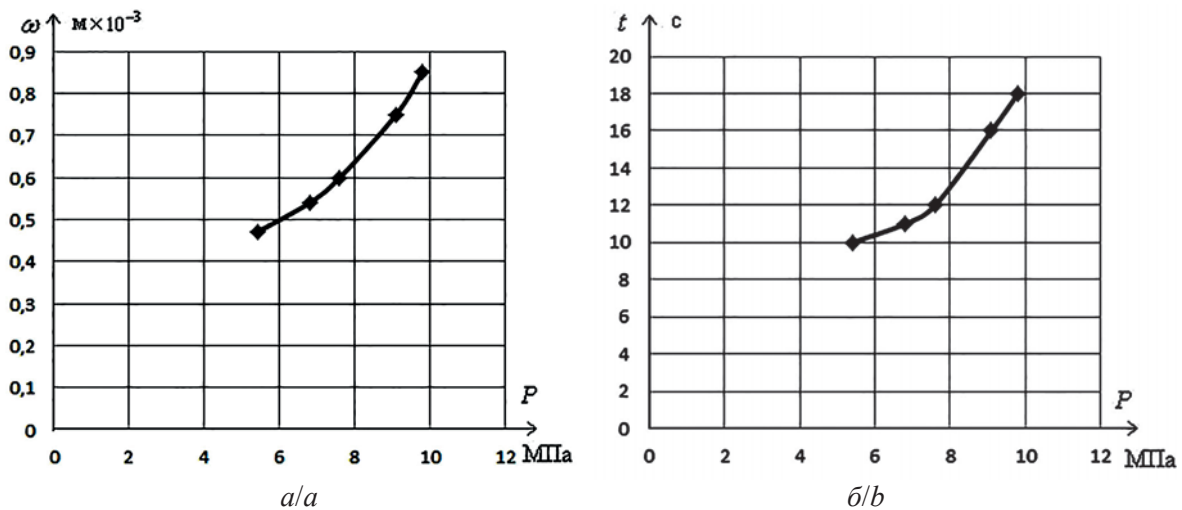


Рис. 5. Графики зависимостей от распределенной внешней нагрузки, действующей на упругий элемент: а) амплитуды колебания  $\omega(P)$ ; б) времени затухания  $t(P)$

Fig. 5. Schedules of dependences on distributed external loading effecting an elastic element of: a) fluctuation amplitude  $\omega(P)$ ; b) attenuation time  $t(P)$

Проведенное исследование выявило, что при проектировании нефтепродуктопровода и подбора измерительной аппаратуры необходимо учитывать не только параметры датчиков, но и диапазон изменения плотности перекачиваемой по трубопроводу жидкости.

Полученная математическая зависимость и основанная на ней имитационная модель позволит оперативно подбирать датчик давления для проектируемого нефтепродуктопровода.

Полученные результаты исследования позволят на практике получить изменение прогиба чувствительного элемента датчика давления в зависимости от давления в трубе и изменения качества перекачиваемой жидкости (её плотности, температуры и химического состава), что позволит вовремя устранить технические неполадки датчика и сбоя работы системы мониторинга трубопровода.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-38-00010 мол.а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вельмисов П.А. Математическое моделирование динамической системы «трубопровод – датчик давления» // Естественные науки: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – С. 22–24.
2. Покладова Ю.В. Динамика упругого элемента датчика давления рабочей среды в трубопроводе // Механика и процессы управления: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2007. – С. 51–56.
3. Вельмисов П.А. О некоторых математических моделях механической системы «трубопровод – датчик давления» // Естественные науки: Сборник научных трудов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – С. 39–44.
4. Анкилов А.В. Математическое моделирование механической системы «трубопровод – датчик давления». – Ульяновск: УЛГТУ, 2008. – 188 с.
5. Мамонова Т.Е. Обнаружение утечек из нефтепровода с использованием устройства для измерения изменений давления // Наука Красноярья. – 2012. – № 5. – С. 102–111.
6. Мамонова Т.Е. Метод определения утечки из нефтепровода, основанный на разности во времени давления // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 216–219.
7. Taler D., Kaczmarski K. Mathematical Modelling of the Transient Response of Pipeline // Journal of Thermal Science. – 2016. – V. 25 – № 6. – P. 549–557.
8. Prokofiev A., Makariyants G., Shakhmatov E. Modeling of pipeline vibration under the pressure pipes in the working fluid / 17<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration (ICSV17). – Cairo, Egypt, 18–22 July, 2010. – P. 1–8.
9. Kovar J., Brezina T. Model of pipeline with pump for predictive control // Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21<sup>st</sup> International DAAAM Symposium. – Vienna, Austria, 2010. – V. 21. – № 1. – P. 1–2.
10. A Model of Pipeline Flow Monitoring in Wide Area Wireless Sensor Network / Umunna Chike Odogwu, O.A. Ezechukwu, Aneke Jude, Okolo Chidiebere // Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET). – 2015. – V. 3 (4C). – P. 463–472.
11. Bimpas M., Amditis A., Uzunoglu N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz // Journal of Applied Geophysics. – 2010. – V. 70 (3). – P. 226–236.
12. Mathematical Model for Pipeline Control Applying in-Line Robotic Device / Yu.L. Kolesnikov, A.S. Pitsyna, O.V. Baranova, D.A. Gurin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – V. 9 (11). – P. 2–11.
13. Mamonova T.E. Using the hydrodynamic models in problems of leaks definition from oil pipelines // Oil Industry. – 2015 – № 4. – P. 92–95.
14. Vel'misov P.A., Pokladova Yu.V. Investigation of dynamics of an elastic element of a pressure sensor // Applications of Mathematics in Engineering and Economics. – Sofia, Bulgaria, 2006. – P. 51–57.
15. Butler S.J., Eney S.L. Numerical Reservoir-Wellbore-Pipeline Simulation Model of the Geysers Geothermal Field // Proc. World Geothermal Congress. – Bali, Indonesia, 25–29 April, 2010. – P. 1–5.

16. Simulation of different mems pressure sensors / V. Shettar, Sh.B. Kotin, B.B. Kirankumar, B.G. Sheeparamatti // International J. of Multidiscipl. Research & Advcs. in Engg. (IJMRAE). – 2014. – V. 6. – № 11. – P. 73–81.
17. Мамонова Т.Е. Математическая модель системы «датчик–трубопровод» при расположении датчика на боковой стенке трубы // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2017. – С. 293–294.
18. Мамонова Т.Е. Исследование прогиба чувствительного элемента датчика давления при его расположении на торцевой стенке трубы // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 09 (63). – С. 44–49.
19. Пьезоэлектрические свойства пьезокерамики // Symmetron. URL: <http://symmetron.ru/suppliers/apc/> (дата обращения: 10.10.2017).
20. Плотность нержавеющей стали. URL: <http://m-k-k.ru/plotnost-nerzhavayushey-stali> (дата обращения: 09.10.2017).
21. Плотность нефти // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8) (дата обращения: 08.10.2017).
22. Тиняков Ю.Н., Милешин С.А., Андреев К.А. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления // Наука и образование. – 2011. – С. 1–13. URL: <http://engineering-science.ru/doc/219081.html> (дата обращения: 08.10.2017).
23. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы // Строительные нормы и правила. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/1/1989/> (дата обращения: 13.10.2017).
24. Высокоточный интеллектуальный датчик давления DMD 331-A-S-GX/AX // Пром Автоматика. URL: <http://shop.pa.ru/Sensors/Pressure/DMD%20331-A-S-GX-AX> (дата обращения: 08.10.2017).
25. Трубы для магистральных газо- и нефтепроводов // Комплексное нефтегазовое снабжение. URL: <http://kngc.ru/trubnaya-produkciya/truby-dlya-magistralnyx-gazo-i-nefteprovodov.html> (дата обращения: 08.10.2017).

Поступила 19.10.2017 г.

#### Информация об авторах

**Мамонова Т.Е.**, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сидорова А.А.**, ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 621.643:51.74:004.94

## DEPENDENCE OF A SENSITIVE ELEMENT DEFLECTION IN A PRESSURE MEASUREMENT SENSOR IN A PIPELINE

**Tatiana E. Mamonova**<sup>1</sup>,  
stepte@tpu.ru

**Anastasiya A. Sidorova**<sup>1</sup>,  
sidorova@tpu.ru

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

**The relevance** of the research is caused by the need to increase a resource of operational life of pressure sensors at oil pipeline operation. Now all enterprises of oil products transportation apply different types of sensors and gages when developing technological processes that gives the chance to initiate fully automated production. When developing such productions much attention is paid to the choice of sensors for obtaining reliable and exact data and extension of their service life that is directly related to reliability of designs and units of a pipe. At the same time, it is necessary to consider influence of pipe parameters and the pumped-over liquid on dynamics of a sensitive element of a sensor as it will allow providing not only necessary accuracy, but it will also increase reliability of a system «pressure sensor – pipeline» and as a result reliability of the system as the whole. Breakage of the equipment or incorrect diagnostics can lead not only to a stop of oil products pumping, but also to the breakage of the system as the whole that corresponds to serious economic and environmental problems. Thus, the task of studying the adequate mathematical model connecting dynamics of a sensitive element of the pressure sensor and pressure in the pipeline is relevant now.

**The main aim** is to define the influence of oil pipeline parameters, pumped-over liquid, and pressure in a pipe on a sensitive element deflection in a pressure sensor located on a pipe sidewall.

**Object:** mathematical model of interaction of liquid pumping pipeline and pressure sensor at its location on a pipe sidewall.

**Methods:** simulation, analysis and assessment of influence of a pipeline and pumped-over liquid parameters on sensor sensitive element deflection.

**Results.** Study of the influence of transported liquid and pressure sensor parameters on the change of sensitive element deflection of the considered device has shown that it is necessary to consider such parameters of the sensor as Poisson's coefficient and sensitive element thickness when selecting pressure sensors. It was determined as well that the density of the pumped-over liquid effects most of all the sensor sensitive element deflection. Using the Simulink application of the MatLab program the authors studied the most widespread pressure sensor of DMD 331-A-S-AX. It was defined that the amplitude of the oscillations sensitive element is 3,5 mm and oscillations time is 180 seconds in case of the most allowable pressure of 9,8 MPa at high measured pressure in a pipe. At increase in pressure the process becomes dispersing that signals a membrane rush.

### Key words:

Mathematical model, pressure sensor, oil pipeline, pipeline parameters, imitating modeling, sensitive element of a sensor.

*The research was financially supported by the RFBR grant no. 16–38–00010.*

### REFERENCES

1. Velmisov P.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoy sistemi «truboprovod – datchik davleniya» [Mathematical modeling of the dynamic system « pipeline – pressure sensor»]. *Estestvennye nauki: Sbornik nauchnykh trudov* [Natural sciences: Collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2010. pp. 22–24.
2. Pokladova Yu.V. Dinamika uprugogo elementa datchika davleniya rabochey sredi v truboprovode [Dynamics of an elastic element of a pressure sensor of a working medium in a pipeline]. *Mekhanika i protsessy upravleniya: Sbornik nauchnykh trudov* [Mechanics and management processes: collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2007. pp. 51–56.
3. Velmisov P.A. O nekotorykh matematicheskikh modelyakh mekhanicheskoy sistemy «truboprovod – datchik davleniya» [Some mathematical models of mechanical system «pipeline – pressure sensor»]. *Estestvennye nauki: Sbornik nauchnykh trudov* [Natural sciences: Collection of scientific works]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2010. pp. 39–44.
4. Ankilov A.V. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskoy sistemy «truboprovod – datchik davleniya»* [Mathematical modeling of the mechanical system «pipeline – pressure sensor»]. Ulyanovsk, UIGTU Press, 2008. 188 p.
5. Mamonova T.E. Detection of leaks from the oil pipeline using a device to measure pressure changes. *Nauka Krasnoyariya*, 2012, no. 5, pp. 102–111. In Rus.
6. Mamonova T.E. The method for defining leaks from an oil pipeline based on a difference in pressure time. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 216–219. In Rus.
7. Taler D., Kaczmarzski K. Mathematical Modelling of the Transient Response of Pipeline. *Journal of Thermal Science*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 549–557.
8. Prokofiev A., Makariyants G., Shakhmatov E. Modeling of pipeline vibration under the pressure pipes in the working fluid. *17<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration (ICSV17)*. Cairo, Egypt, 18–22 July, 2010. pp. 1–8.
9. Kovar J., Brezina T. Model of pipeline with pump for predictive control. *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21<sup>st</sup> International DAAAM Symposium*. Vienna, Austria, 2010, vol. 21, no. 1, pp. 1–2.
10. Umunna Chike Odogwu, Ezechukwu O.A., Aneke Jude, Okolo Chidiebere. A Model of Pipeline Flow Monitoring in Wide Area Wireless Sensor Network. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 2015, vol. 3 (4C), pp. 463–472.
11. Bimpas M., Amditis A., Uzunoglu N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, vol. 70 (3), pp. 226–236.

12. Kolesnikov Yu.L., Ptitsyna A.S., Baranova O.V., Gurin D.A. Mathematical Model for Pipeline Control Applying in-Line Robotic Device. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9 (11), pp. 2–11.
13. Mamonova T.E. Using the hydrodynamic models in problems of leaks definition from oil pipelines. *Oil Industry*, 2015, no. 4, pp. 92–95.
14. Velmisov P.A., Pokladova Yu.V. Investigation of dynamics of an elastic element of a pressure sensor. *Applications of Mathematics in Engineering and Economics*. Sofia, Bulgaria, 2006. pp. 51–57.
15. Butler S.J., Eney S.L. Numerical Reservoir-Wellbore-Pipeline Simulation Model of The Geysers Geothermal Field. *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 25–29 April, 2010. pp. 1–5.
16. Shettar V., Kotin Sh.B., Kirankumar B.B., Sheeparamatti B.G. Simulation of different mems pressure sensors. *International J. of Multidiscipl. Research & Advcs. in Engg. (IJMRAE)*, 2014, vol. 6, no. 11, pp. 73–81.
17. Mamonova T.E. Matematicheskaya model sistemy «datchik – truboprovod» pri raspolozhenii datchika na bokovoy stenke truby [Mathematical model «sensor –pipeline» system when a sensor is on a pipe sidewall]. *Sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Molodezh i sovremennye informatsionnie tekhnologii* [International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists. Youth and modern information technologies]. Tomsk, 2017. pp. 293–294.
18. Mamonova T.E. Research of a sensitive element deflection in a pressure sensor arranged on a face wall of a pipe. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2017, no. 09 (63), pp. 44–49. In Rus.
19. Pyezoelektricheskie svoystva pyezokeramiki [Piezoelectric properties of a piezoceramics]. *Symmetron*. Available at: <http://symmetron.ru/suppliers/apc/> (accessed 10 October 2017).
20. Plotnost nerzhaveyushey stali [Density of stainless steel]. Available at: <http://m-k-k.ru/plotnost-nerzhaveyushey-stali> (accessed 9 October 2017).
21. Plotnost nefiti [Oil density]. *Vikipediya*. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B8) (accessed 8 October 2017).
22. Tinyakov Yu.N., Milesin S.A., Andreev K.A. Analysis of designs of pressure sensors foreign prototypes. *Nauka i obrazovaniye*, 2011, pp. 1–13. In Rus. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/219081.html> (accessed 8 October 2017).
23. SNiP 2.05.06–85. Magistralnye truboprovody [Main pipelines]. *Stroitelnye normy i pravila* [Constructions norms and regulations]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/1/1989/> (accessed 13 October 2017).
24. Vysokotochny intellektualny datchik davleniya DMD 331-A-S-GX/AX [High-precision intelligent pressure sensor DMD 331-A-S-GX/AX]. *PromAvtomatika*. Available at: [http://shop.pa.ru/Sensors/Pressure/DMD%20331-A-S-GX\\_AX](http://shop.pa.ru/Sensors/Pressure/DMD%20331-A-S-GX_AX) (accessed 8 October 2017).
25. Truby dlya magistralnykh gazo- i nefteprovodov [Pipes for main gas- and oil pipelines]. *Kompleksnoe neftegazovoe snabzhenie* [Complex oil and gas supply]. Available at: <http://kngc.ru/trubnaya-produkciya/truby-dlya-magistralnyx-gazo-i-nefteprovodov.html> (accessed 8 October 2017).

*Received: 19 October 2017.*

#### Information about the authors

**Tatiana E. Mamonova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anastasiya A. Sidorova**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9:005.93

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Ильина Марина Николаевна<sup>1</sup>,  
ilmn1340@gmail.com

Ильина Галина Федоровна<sup>2</sup>,  
ilgf@sibmail.com

<sup>1</sup> ООО «НИИ Транснефть»,  
Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47А.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности предприятий нефтегазодобывающего комплекса посредством соблюдения условий по энергетической эффективности деятельности нефтедобывающих предприятий Томской области на примере ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК» при безусловном обеспечении непрерывности технологических процессов добычи и надежности работы оборудования, выполнении существующих санитарных норм, и на этой базе снижении затрат на потребление топливно-энергетических ресурсов. Оценка энергетической эффективности базируется на основе качественной оценки существующего состояния энергопотребления, которая может быть объективной исключительно при условии организации надлежащего коммерческого, внутрихозяйственного и технического учета энергоресурсов.

**Цель:** обосновать применение организационных мероприятий по повышению энергоэффективности для обеспечения устойчивого ведения технологического процесса добычи нефти, всех вспомогательных технических процессов, а также соответствия критериям технологической безопасности. Практическое использование имеющихся резервов повышения энергоэффективности должно базироваться на достоверных учетных данных автоматизированного мониторинга энергопотребления на нефтедобывающем предприятии, системного анализа и прогнозирования потребления энергоресурсов, а также на системном анализе отраслевых энергетических балансов (проведение бенчмаркинг-исследований).

**Объект:** аналитический метод оценки количественных показателей потребления топливно-энергетических ресурсов при добыче единицы продукта. Коммерческий учет электрической энергии для таких нефтедобывающих предприятий Томской области, как ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК», осуществляется по коммерческим счетчикам, установленным на границе балансовой принадлежности электрических сетей, а также по системе автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии, принятой для коммерческих расчетов на оптовом рынке электрической энергии (мощности). Для организации системного мониторинга и анализа потребления электрической энергии этого недостаточно. Для нефтедобывающих предприятий ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть», ОАО «ВТК» объем потребления электроэнергии среди иных топливно-энергетических ресурсов в год составляет порядка 87 %. При этом самым энергоемким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях является механизированная добыча нефти – на долю приводов скважинных насосов приходится до 60 % всей потребляемой предприятием электроэнергии.

В результате исследования предложены организационные мероприятия, нацеленные на повышение энергоэффективности процесса добычи нефти.

### **Ключевые слова:**

Энергоэффективность, энергосбережение, бенчмаркинг, добыча нефти, топливно-энергетические ресурсы.

### **Политика энергосбережения**

Повышение энергоэффективности является непременным условием обеспечения конкурентоспособности и основной мотивацией к достижению энергоэффективных показателей через модернизацию оборудования, применение новых технологических решений, а также внедрение организационных мероприятий.

Необходимо отметить, что оценка эффективности технологических решений не может базироваться только на качественной оценке существующего состояния энергопотребления нефтедобывающих предприятий, которая может быть объективной только при условии организации надлежащего коммерческого, внутрихозяйственного и технического учета энергоресурсов.

В настоящее время одним из направлений осуществления политики энергосбережения и

энергоэффективности новых управленческих инструментов является бенчмаркинг. Бенчмаркинг – это процесс определения, понимания и адаптации имеющихся примеров эффективного функционирования компании с целью улучшения собственной работы [1–4]. Он в равной степени включает в себя два процесса: оценивание и сопоставление. В рамках бенчмаркинга энергоэффективности происходит организация обмена информацией по вопросам энергоэффективности и энергосбережения.

Бенчмаркинг чистых показателей эффективности, т. е. тех показателей, за счет которых возможно обеспечить снижение потребления энергетических ресурсов без нарушений режимов и объемов работы (в данном случае – добычи нефти), не всегда позволяет решить фундаментальные вопросы конкурентоспособности. Однако он помогает

представить в количественной форме возможные достижения и поставить задачи.

Практическое использование имеющихся резервов повышения энергоэффективности должно базироваться на достоверных учётных данных автоматизированного мониторинга энергопотребления на нефтедобывающем предприятии, системного анализа и прогнозирования потребления энергоресурсов, а также на системном анализе отраслевых энергетических балансов (проведение бенчмаркиговых исследований) [2].

Не существует одного единственного фактора, определяющего состояние всей энергосистемы. Условия постоянно меняются. Обеспечение энергоэффективности требует постоянного внимания ко всему комплексу факторов. Реализация оптимального управления энергоснабжением предприятия может быть осуществлена с помощью автоматизированной системы учета энергоресурсов (АСКУЭр).

Система диспетчерского управления энергохозяйством в рамках АСКУЭр представляет собой информационно-управляющую подсистему и включает, автоматизированное рабочее место диспетчера (энергоменеджера).

Энергоменеджер АСКУЭр осуществляет ведение базы данных энергосберегающих мероприятий. База данных энергосберегающих мероприятий является основой для формирования и актуализации планов технических (организационных) мероприятий, предусмотренных программой энергосбережения нефтедобывающей организации.

Предложенные организационные мероприятия по повышению энергоэффективности разработаны в соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 18.04.2012 № 309 «Об организации работы в Министерстве образования и науки Российской Федерации по реализации закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» с учетом требований Приказа Министерства энергетики РФ от 30.06.2014 № 398 «Об утверждении требований к форме программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций с участием государства и муниципального образования, организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности, и отчетности о ходе их реализации».

Начиная на предприятии работу по энергетическому менеджменту, необходимо определиться с целями. Является ли приоритетом снижение физических объемов потребляемой энергии либо платежей за энергопотребление. В ряде случаев эти цели могут оказаться не тождественными.

Важным моментом является определение границ системы, в которых внедряется энергетический менеджмент. От установки границ, с одной стороны, зависит объем вовлеченного персонала и подразделений предприятия, а значит, специфика создаваемой системы энергоменеджмента, а с другой, границы могут изменять оценку энергетической эффективности (одно и то же мероприятие может показывать разные эффекты в разных границах). Необходимо учитывать особенности энерготехнологического комбинирования и эффекты сопутствующих взаимовлияющих мероприятий.

#### **Бенчмаркиговое исследование энергоэффективности деятельности**

В настоящее время коммерческий учет электрической энергии для таких нефтедобывающих предприятий Томской области, как ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК», осуществляется по коммерческим счетчикам, установленным на границе балансовой принадлежности электрических сетей, а также по системе автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии), принятой для коммерческих расчетов на оптовом рынке электрической энергии (мощности). Для организации системного мониторинга и анализа потребления электрической энергии этого недостаточно. Для нефтедобывающих предприятий ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть», ОАО «ВТК» объем потребления электроэнергии среди иных топливно-энергетических ресурсов в год составляет порядка 87 %. При этом самым энергоёмким технологическим процессом на нефтедобывающих предприятиях является механизированная добыча нефти – на долю приводов скважинных насосов приходится до 60 % всей потребляемой предприятием электроэнергией [5–10].

Опираясь на исследования крупных российских нефтедобывающих компаний, внедривших систему энергетического менеджмента, можно сделать вывод о значимости следующих факторов для повышения не только энергетической эффективности, но и эффективности системы управления предприятия в целом:

1. Организация системного энергетического мониторинга и анализа, в том числе с использованием удельных показателей расхода топливно-энергетических ресурсов на производство единицы продукции (общий расход энергии/количество единиц).

2. Осуществление отраслевого бенчмаркинга, в том числе международного, для анализа результативности и установки целей.

3. Увязка ключевых показателей по энергоэффективности с вознаграждением высшего руководства, а также увязка вознаграждения сотрудников с результатами деятельности в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Такая система наиболее эффективна, когда охватывает все основные производственные и обеспечивающие подразделения нефтедобы-



вающих предприятий. Рекомендуется использовать механизм ключевых показателей результативности для менеджеров и структурных подразделений по каждому направлению деятельности организации в разрезе каждого года, их целевые и фактические значения. Система энергетического менеджмента построена на принципе постоянного улучшения, что подразумевает подход к ней не как к разовому, а как к длящемуся процессу.

Аналогично другим системам менеджмента, энергетический менеджмент также опирается на цикл Деминга «планирование–осуществление–проверка–корректировка» (plan–do–check–act) сначала 4–9 [11–20], который широко используется и в других сферах корпоративного менеджмента. Он представляет собой динамическую модель циклического характера, в которой завершение одного цикла становится началом следующего.

Объектами исследования являются следующие месторождения: Верхнекомбарское, Ондатровое, Селимхановское НГК, Сатпаевское у ООО «Жиант»; Ясное, Гуларинское, Речное, Южно-Мыльджинское, Верхне-Салатское у ЗАО «Томская нефть»; Пуглалымское, Ключевское, Средненюрольское у ОАО «ВТК».

Удельные показания добычи нефти по годам для нефтедобывающих предприятий ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК» по годам представлены на рис. 1.

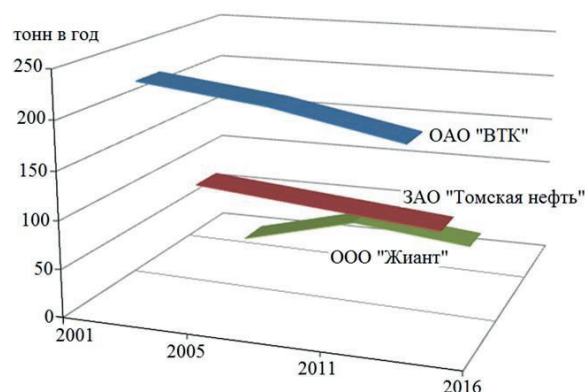


Рис. 1. Объем добычи нефти

Fig. 1. Volume of oil production

Предлагаемая методика проведения отраслевого бенчмаркинга для нефтедобывающих предприятий заключается в выполнении сравнительных расчетов с приведением к единым условиям:  $Q$  – объем нефти, поступающей из скважины в единицу времени,  $n$  насосных агрегатов с коэффициентом полезного действия  $\eta$  при работе с неизменной производительностью на протяжении всего расчетного периода, с возможностью включения в расчет особенностей профиля поперечного сечения ствола скважины;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H_d$  – динамический уровень;  $\rho$  – плотность добываемой жидкости.

Нормативное удельное энергопотребление нефтедобывающего оборудования определяется как

расход электроэнергии на подъем одной тонны нефти (массовый расход) либо как расход электроэнергии на подъем одного кубометра скважинной жидкости (объемный расход). Так как нефть в чистом виде уже практически нигде не добывается, то под объемным расходом понимается добыча скважинной жидкости.

В наибольшей степени на изменение удельного энергопотребления добычи нефти оказывает влияние гидродинамическое состояние эксплуатируемых пластов. Мощность, затрачиваемую на подъем жидкости, можно рассчитать по формуле [5]:

$$N = \frac{\left(\frac{Q}{86400}\right) H_d \rho g \cdot 10^{-3}}{\eta}.$$

Как видно из формулы, изменение динамического уровня при постоянном уровне добычи жидкости приводит к прямо пропорциональному изменению удельного энергопотребления.

Удельное потребление электроэнергии предприятиями ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК»  $E_{уд} = E/W$  вычисляется с учетом представленных в опросных листах данных об энергии, потребляемой насосами за плановый период  $T$ , и выполненной работы по добыче жидкости.

В качестве приводов станков-качалок на указанных предприятиях используются короткозамкнутые асинхронные электродвигатели в закрытом обдуваемом исполнении с повышенным пусковым моментом напряжением 380 В и мощностью от 7,5 до 55,0 кВт. Электродвигатели, применяемые в электроприводах штанговых глубинных насосов, имеют синхронную частоту вращения 1500 об/мин, кратность пускового момента (отношение начального пускового момента к номинальному) 1,8...2,0, кратность максимального момента 2,2...2,8.

Расчет потерь в электродвигателях станков-качалок осложняется тем, что нагрузка является периодически изменяющейся в каждом цикле качания, соответственно все параметры электродвигателя, в том числе коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, также изменяются внутри каждого цикла.

### Результаты исследования

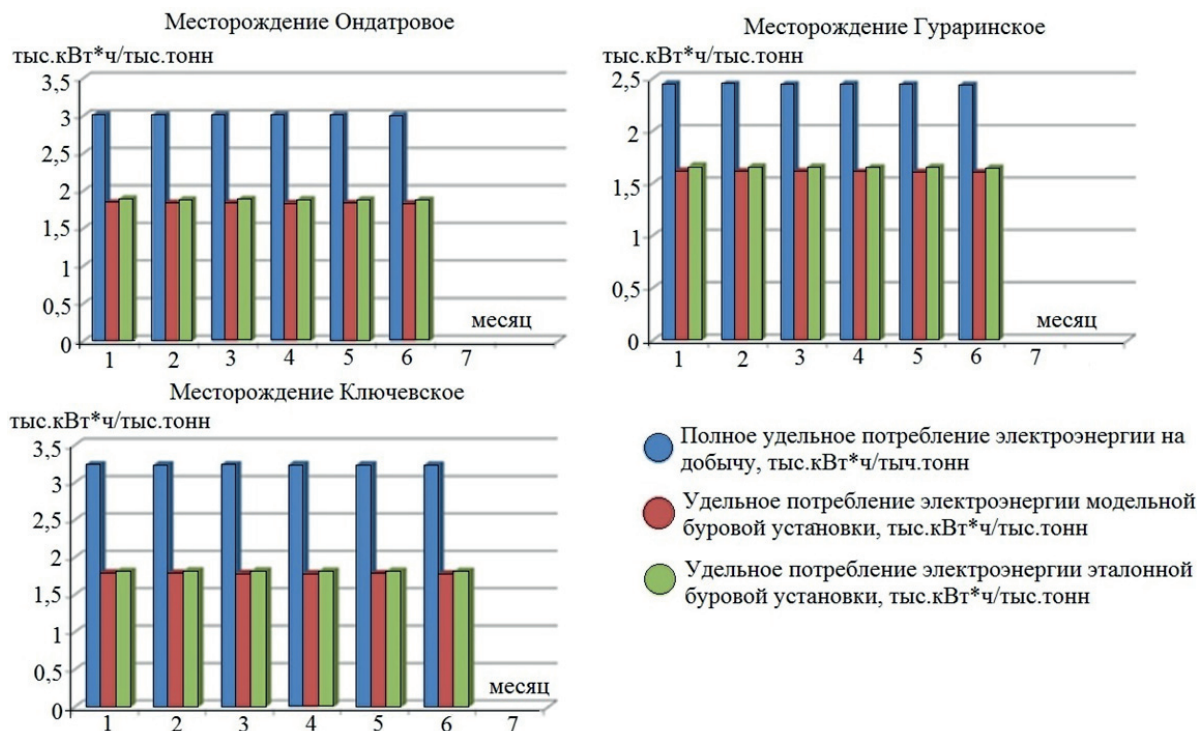
Для получения возможности сравнения энергоэффективности различных буровых установок в сравнимых приведенных условиях введено понятие эталонной жидкости с вязкостью  $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и плотностью  $850 \text{ кг}/\text{м}^3$ , эталонного насосного агрегата с  $\eta=0,8$ . Сравнительный расчет выполнен для нефтяных месторождений Ондатровое, Гуларинское, Ключевское. Коэффициент нефтеотдачи для указанных месторождений составляет 0,7. Результаты сводных расчетов представлены в таблице.

По результатам сводных расчетов потребления электрической энергии на основании предоставленных данных становятся очевидными достаточно низкие показатели энергоэффективности (рис. 2).

**Таблица.** Сравнительные результаты расчета

**Table.** Comparative calculation results

Показатели/Indicators	Январь January	Февраль February	Март March	Апрель April	Май May	Июнь June
Ондатровое месторождение/Ondatrovoye deposit						
Влияние плотности, вязкости/Effect of density, viscosity	0,853	0,847	0,861	0,799	0,801	0,814
Полное удельное потребление электроэнергии на добычу, тыс. кВт·ч/тыс. т Total specific electricity consumption for production, thousand kW·h/thousand tons	3,020	3,017	3,019	3,018	3,017	3,015
Удельное потребление электроэнергии модельной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the model drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,850	1,847	1,848	1,845	1,844	1,840
Удельное потребление электроэнергии эталонной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the reference drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,901	1,890	1,895	1,892	1,890	1,885
Гуларинское месторождение/Gurarinское deposit						
Влияние плотности, вязкости/Effect of density, viscosity	0,832	0,851	0,845	0,799	0,801	0,812
Полное удельное потребление электроэнергии на добычу, тыс. кВт·ч/тыс. т Total specific electricity consumption for production, thousand kW·h/thousand tons	2,451	2,448	2,446	2,450	2,446	2,441
Удельное потребление электроэнергии модельной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the model drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,620	1,617	1,615	1,610	1,608	1,606
Удельное потребление электроэнергии эталонной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the reference drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,670	1,660	1,658	1,651	1,655	1,648
Ключевское месторождение/Klyuchevskoye deposit						
Влияние плотности, вязкости/Effect of density, viscosity	0,842	0,825	0,801	0,824	0,814	0,809
Полное удельное потребление электроэнергии на добычу, тыс. кВт·ч/тыс. т Total specific electricity consumption for production, thousand kW·h/thousand tons	3,241	3,238	3,239	3,242	3,240	3,236
Удельное потребление электроэнергии модельной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the model drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,794	1,790	1,788	1,785	1,784	1,780
Удельное потребление электроэнергии эталонной буровой установки, тыс. кВт·ч/тыс. т Specific power consumption of the reference drilling rig, thousand kW·h/thousand tons	1,815	1,822	1,820	1,818	1,816	1,814



**Рис. 2.** Сводные результаты расчета

**Рис. 2.** Summary results of calculation

Из представленных рисунков видно, что полное удельное потребление электроэнергии на добычу значительно превышает удельное потребление энергии модельной и эталонной буровой установки в сопоставимых условиях.

#### Заключение

Наилучший результат среди трех рассматриваемых предприятий наблюдается у ЗАО «Томская нефть», в связи с чем, в целях обеспечения системного подхода к процессу энергосбережения и постоянного повышения энергетической эффективности посредством внедрения системы энергетического менеджмента в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 50001:2011, деятельность предприятий ООО «Жиант» и ОАО «ВТК» должна опираться на следующие ключевые моменты:

- внедрение системы энергетического менеджмента (СЭнМ) в целях обеспечения системного подхода к процессу энергосбережения и постоянного повышения энергетической эффективности;
- организация обучения основам энергоэффективности сотрудников, задействованных в процессе энергосбережения;
- учет показателей энергопотребления при оценке выполнения целевых показателей энергетической эффективности хозяйственной деятельности;
- определение параметра энергоэффективности основного оборудования и, в случае необходимости, предложений по внесению изменений в нормативные документы предприятия;

- включение параметров энергоэффективности в процедуру приемки результатов капитального ремонта и модернизации основного оборудования;
- оптимизация режимов добычи;
- внедрение информационно-аналитической системы энергоменеджера;
- проведение анализа эффективности работы нефтеизвлекающих агрегатов, создание реестра эффективности работы оборудования;
- создание информационной системы «Автоматизированная система расчета показателей энергоэффективности работы технологического оборудования буровой станции»;
- оптимизация применяемых отраслевых технических решений по строительству (реконструкции) объектов буровой станции;
- обеспечение сохранения параметров энергоэффективности оборудования, предусмотренных в основной проектной документации, при внесении изменений;
- введение параметра энергоэффективности в типовой опросный лист на закупку нового оборудования;
- введение в типовую договор на закупку гарантийных обязательств поставщика по обеспечению установленных параметров энергоэффективности;
- организация информационной работы с работниками ООО «Жиант», ЗАО «Томская нефть» и ОАО «ВТК» и внешней аудиторией.

При реализации указанных мероприятий ожидаемое снижение потребления электрической энергии, согласно бенчмаркинговому анализу достигнутых результатов у ПАО «НК «Роснефть» при сопоставимых условиях, составит 17 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов И.П., Данилова Т.В. Бенчмаркинг как основа создания конкурентоспособного предприятия. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 69 с.
2. Pffiffer R. Mit den Besten Lerner durch Benchmarking // Meilenstein. – 2005. – № 4. – S. 17.
3. ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use». – Geneva: International Organization for Standardization, 2011. – 22 с.
4. ГОСТ 31532–2012 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения». – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
5. Булатов А.И. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2003. – 1007 с.
6. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы. – М.: Недра, 1988. – 501 с.
7. Кэмп Р.С. Легальный промышленный шпионаж: бенчмаркинг бизнес-процессов; технологии поиска и внедрение лучших методов работы ваших конкурентов / пер. с англ. О.В. Теплих. – Днепропетровск: Баланс-Клуб, 2004. – 395 с.
8. Alireza Bahadori. Oil and gas pipelines and piping systems. – Australia: Elsevier, 2016. – 627 p.
9. Fingas M. Oil spill science and technology. – Canada: GPP, 2017. – 1025 p.
10. Playfoot J., Augustus S., Andrew Ph. Education and training for the oil and gas industry. – Cambridge: Getenergy Intelligence, 2017. – 113 p.
11. Murty P.S.R. Electrical power systems. – Cambridge: BSP Books Pvt. Ltd, 2017. – 814 p.
12. Selley R.C., Sonnenberg S. Elements of petroleum geology. – San Diego: Academic press, 2015. – 507 p.
13. Lohmuller B. Benchmarking in der Praxis. – М.: Провокация Роста, 2006. – 6 с.
14. Smith C.B., Parmenter K.E. Energy management principles. – Amsterdam: Elsevier, 2016. – 410 p.
15. Energy Efficiency and Renewable Energy in New Year Six Report. March 2001 to 2007. – М.: Провокация Роста, 2009. – 41 p.
16. Energy Efficiency Directive. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012. – М.: Провокация Роста, 2012. – 88 p.
17. Парий А.В. НДТ: Российский опыт бенчмаркинга. – М.: Провокация Роста, 2012. – 59 с.
18. Lianzhong Sun. Models and tests of casing wear in drilling for oil and gas // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2012. – V. 4. – P. 44–47.
19. Complementing Production Logging with Spectral Noise Analysis to Improve Reservoir Characterisation and Surveillance / N. Suarez, A. Otubaga, N. Mehrotra, A. Aslanyan, I. Aslanyan, M. Kha-

bibullin, J. Barghouti, Y. Maslenikova // SPWLA 54<sup>th</sup> Annual Symposium. – New Orleans, Louisiana, USA, 22–26 June, 2013. – P. 138–146.

20. Integrated Formation MicroImager (FMI) and Spectral Noise Logging (SNL) for the study of fracturing in carbonate reservoirs /

A. Aslanyan, I. Aslanyan, R. Minakhmetova, Yu. Maslennikova, R. Karantharath, Badar Al Hadhrami // SPE-177616-MS. – 2015. – P. 211–217.

*Поступила 28.12.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Ильина М.Н.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории энергоэффективных технологий транспорта нефти и нефтепродуктов ООО «НИИ Транснефть».

**Ильина Г.Ф.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.



UDC 620.9:005.93

## ORGANIZATIONAL ACTIVITIES TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY ON THE EXAMPLE OF OIL-PRODUCERS OF ENTERPRISES IN TOMSK REGION

Marina N. Ilina<sup>1</sup>,  
ilmn1340@gmail.com

Galina F. Ilina<sup>2</sup>,  
ilgf@sibmail.com

<sup>1</sup> Pipeline Transport Institute (LLC),  
47A, Sevastopol Avenue, Moscow, Russia, 117186.

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

**The relevance** of the research is caused by the need to increase the energy efficiency of activities of the oil companies «Zhiant», «Tomskaya Neft» and «VTK», while unconditionally ensuring the continuity of the technological processes of extraction and reliability of the equipment, the implementation of existing sanitary standards, and, on this basis, fuel and energy resources.

**The main aim** of the study is to justify the use of organizational measures to increase energy efficiency to ensure sustainable management of the technological process of oil production, all auxiliary technical processes, as well as compliance with the criteria of technological safety. The practical use of available energy efficiency reserves should be based on reliable accounting data for automated monitoring of energy consumption at oil producing enterprise, system analysis and forecasting of energy consumption and also on system analysis of sectoral energy balances (benchmarking studies).

**Object:** an analytical method for estimating the quantitative indicators of consumption of fuel and energy resources in the extraction of a product unit. Commercial accounting of electric power for such oil-producing enterprises of Tomsk region as «Zhiant», «Tomskaya Neft» and «VTK» is carried out by commercial meters installed on the border of the balance sheet of electrical networks, as well as by the automated system of commercial electricity metering), adopted for commercial settlements in the wholesale electricity (capacity) market. It is not enough to organize system monitoring and analysis of electricity consumption). For oil companies «Zhiant», «Tomskaya Neft», «VTK» the volume of electricity consumption for year is about 87 % among other fuel and energy resources. At the same time, the most energy-intensive technological process at oil-extracting enterprises is mechanized oil production – the share of drives of downhole pumps accounts for up to 60 % of the total electricity consumed by the enterprise.

**The results.** The authors have proposed the organizational measures aimed at increasing the energy efficiency of oil production.

### Key words:

Energy efficiency, energy saving, benchmarking, oil production, fuel and energy resources.

### REFERENCES

1. Danilov I.P., Danilova T.V. *Benchmarking kak osnova sozdaniya konkurentosposobnogo predpriyatiya* [Benchmarking as a basis for creating a competitive enterprise]. Moscow, Standarty i kachestvo Publ., 2005. 69 p.
2. Pffiffer R. Quantum Leap for Enterprises. *Meilenstein*, 2005, no. 4, p. 17. In Germ.
3. *ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use»*. Geneva, International Organization for Standardization, 2011. 22 p.
4. *GOST 31532–2012 Enegrosberezhenie. Energeticheskaya effektivnost. Sosta pokazateley. Obshchie polozeniya* [State Standard 31532–2012 Energy saving. Energy efficiency. Composition of indicators. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 12 p.
5. Bulatov A.I. *Tekhnika i tekhnologiya bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Technique and technology of drilling oil and gas wells]. Moscow, Nedra – Business Tsentr Publ., 2003. 1007 p.
6. Bagramov R.A. *Burovye mashiny i komplekсы* [Drilling machines and complexes]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 501 p.
7. Camp R.S. *Legalny promyshlenny shpionazh: benchmarking biznes-protsessov; tekhnologii poiska i vnedrenie luchshikh metodov raboty vashikh konkurentov* [Legal industrial espionage: benchmarking of business processes; search technologies and introduction of the best practices of your competitors]. Translated from English by O.V. Tepikh. Dnepropetrovsk, Balans-Klub Publ., 2004. 395 p.
8. Bahadori A. *Oil and gas pipelines and piping systems*. Australia, Elsevier, 2016. 627 p.
9. Mervin Fingas. *Oil spill science and technology*. Canada, GPP, 2017. 1025 p.
10. Playfoot J., Augustus S., Andrew Ph. *Education and training for the oil and gas industry*. Cambridge, Getenergy Intelligence, 2017. 113 p.
11. Murty P.S.R. *Electrical power systems*. Cambridge, BSP Books Pvt. Ltd, 2017. 814 p.
12. Selley R.C., Sonnenberg S. *Elements of petroleum geology*. San Diego, Academic press, 2015. 507 p.
13. Lohmuller B. *Benchmarking in der Praxis*. Moscow, Provokatsiya rosta, 2006. 6 p.
14. Smith C.B., Parmenter K.E. *Energy management principles*. Amsterdam, Elsevier, 2016. 410 p.
15. *Energy Efficiency and Renewable Energy in New Year Six Report. March 2001 to 2007*. Moscow, Provokatsiya rosta, 2009. 41 p.
16. *Energy Efficiency Directive. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012*. Moscow, Provokatsiya rosta, 2012. 88 p.
17. Pariy A.V. *NDT: Rossiyskiy opyt benchmarkinga* [NDT: Russian experience in benchmarking]. Moscow, Provokatsiya rosta, 2012. 59 p.
18. Lianzhong Sun. Models and tests of casing wear in drilling for oil and gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2012, vol. 4, pp. 44–47.
19. Suarez N., Otubaga A., Mehrotra N., Aslanyan A., Aslanyan I., Khabibullin M., Barghouti J., Maslenikova Y. Complementing

Production Logging with Spectral Noise Analysis to Improve Reservoir Characterisation and Surveillance. *SPWLA 54<sup>th</sup> Annual Symposium*. New Orleans, Louisiana, USA, 22–26 June, 2013. pp. 138–146.

20. Aslanyan A., Aslanyan I., Minakhmetova R., Maslennikova Yu., Karantharath R., Badar Al Hadrhrami. Integrated Formation Mic-

roImager (FMI) and Spectral Noise Logging (SNL) for the study of fracturing in carbonate reservoirs. *SPE-177616-MS*, 2015, pp. 211–217.

*Received: 28 December 2017.*

#### **Information about the authors**

**Marina N. Ilina**, Cand. Sc., senior researcher, Pipeline Transport Institute (LLC).

**Galina F. Ilina**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 556; 330.15; 332.36

## ВОПРОСЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ Г. ТОМСКА В УСЛОВИЯХ РЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА

Попов Виктор Константинович<sup>1</sup>,  
pvk@tpu.ru

Студенова Ксения Викторовна<sup>1</sup>,  
gtc@t-sk.ru

Козина Мария Викторовна<sup>1</sup>,  
marijamkozina@gmail.com

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

**Актуальность** работы обусловлена тем, что решение современных проблем надежности в эксплуатации объектов инженерной инфраструктуры и их изношенности является одним из основных показателей уровня развития инженерной инфраструктуры и показателем качества жизни населения. Происходящие земельные преобразования, связанные с коренными изменениями правовых основ градостроительной деятельности и землеустройства, значительно ограничивают возможность образования и предоставления земельных участков для строительства объектов инженерной инфраструктуры. Для оценки сложившейся ситуации проведен подробный анализ градостроительных процедур для размещения линейных объектов. А с вопросами территориального планирования очень тесно связаны вопросы идентификации, модернизации и комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры, которое требует как улучшения технического состояния инженерных систем, так и актуализации картографического (топографического) материала. Рассматриваемые вопросы особо актуальны для г. Томска. В связи с чем рассматриваются проблемы планирования и формирования инженерной инфраструктуры на примере г. Томска.

**Цель:** произвести анализ градостроительных процедур для размещения линейных объектов на городских территориях и выявить варианты осуществления строительства линейных объектов в условиях значительного реформирования градостроительного и земельного законодательства в отношении размещения объектов инженерной инфраструктуры.

Используются **методы** теоретического анализа изучения и обобщения, синтеза, сравнения, группировки, табличного представления данных, экспертных оценок и другие, а также иные общепринятые аналитические методы.

В результате проведенного анализа действующего законодательства были сформированы схемы по порядку действий для размещения линейных объектов на территории г. Томска и Томской области на основании разрешения на использование земельных участков и схемы по порядку получения разрешения на строительство линейного объекта, образование которого предусмотрено утвержденным проектом планировки и проектом межевания территории. Установлено, что государство определило приоритет проектам планировки и межевания территории по принятию решений об использовании городских земель. Предложены мероприятия по устранению противоречий в отношении вопросов, связанных с планированием и размещением объектов инженерной инфраструктуры в проектах планировки и межевания территории, обеспечивающие качественную и актуальную информацию на дежурных планах о месторасположении инженерных коммуникаций в границах города, поскольку именно дежурные планы являются единственной основой построения муниципальных геоинформационных и кадастровых информационных систем.

### Ключевые слова:

Земельные отношения, проект планировки, инфраструктура, линейный объект, строительство, территориальное планирование, оценка.

### Введение

Современные прогрессивные механизмы, постепенно внедряемые в России, которые свойственны всем развитым и развивающимся странам, по усилению роли стратегий в социально-экономическом развитии опираются на планирование и прогнозирование национальных, региональных и местных интересов социально-экономического развития, что должно предусматривать соблюдение условий защиты окружающей среды и содействия устойчивому росту. Но существуют определенные противоречия в достижении этих исключительно прогрессивных целей. Они выражаются в неполном выполнении поставленных задач, в нарушениях согласования национальных, региональных, местных планов [1] и интересов населения. А именно, это касается планирования и про-

гнозирования изменения стоимости земельно-имущественного комплекса в зависимости от реализации стратегических и территориальных решений на уровне субъектов РФ и муниципалитетов. После распада Советского Союза и упразднения структуры Госплана народнохозяйственное планирование в постсоветской России фактически прекратилось. Планы и программы продолжали разрабатываться, но общегосударственной политики в области подготовки стратегических документов не было. В 1995 г. в стране был принят закон «О государственном прогнозировании и программах социально-экономического развития РФ». Он определял цели и содержание системы государственных прогнозов социально-экономического развития России на долгосрочную и среднесрочную перспективу, устанавливал содержание ее

программ, а также общий порядок разработки прогнозов [2]. С 2000 по 2009 гг. были разработаны документы среднесрочного планирования. Для создания необходимых условий экономического роста и наглядного представления сценариев развития страны и повышения качества жизни населения в 2012 г. правительством были утверждены и вступили в действие девять «дорожных карт», которые определили основные направления государственной политики в сфере земельных отношений (в том числе в сфере строительства, кадастрового учета недвижимого имущества и в сфере оценочной деятельности). В первую очередь утвержденные планы были направлены на формирование благоприятного предпринимательского климата и сокращение административных барьеров в сфере земельно-имущественных отношений. В рамках реализации «дорожных карт» земельное и градостроительное законодательство претерпело множество изменений, в том числе касающихся и правового регулирования размещения линейных объектов.

#### **Анализ состояния систем коммунальной инфраструктуры в г. Томске**

Совокупность систем (линейных объектов) водоснабжения, канализации, электроснабжения, газоснабжения и теплоснабжения определяет состав инженерной инфраструктуры. Уровень развития инженерной инфраструктуры является показателем качества жизни населения, а также оказывает влияние на формирование инвестиционного климата и привлечение инвестиций в экономику города.

Для современных российских городов проблема надежности эксплуатации объектов инженерной инфраструктуры и их изношенности является одним из основных факторов, сдерживающих строительство жилья и объектов общественно-делового назначения на территории города, а особенно актуально это для г. Томска.

Сегодня город нуждается в модернизации коммунальной инфраструктуры, а также в ее идентификации, поскольку значительная доля инженерных коммуникаций отсутствует на дежурных планах города.

Подземное пространство города размещает в себе обширную и сложную сеть элементов инженерной инфраструктуры, которые лежат в основе современной цивилизационной жизни [3]. Старение и растущий спрос обновления инженерных коммуникаций определяет требования к поиску [4] и точному определению местоположения коммуникаций, а также к оценке ее состояния.

Проблемы определения местоположения и состояния подземной инфраструктуры актуальны не только для российских городов, но и для городов Великобритании и США [3, 4].

Сегодня нет единой технологии, которая могла бы позволить найти все подземные коммуникации без ошибок. Но в последнее десятилетие произо-

шли значительные изменения в этой области. В России начинают внедряться новейшие гироскопические измерительные системы для определения трехмерных координат расположения трубопроводов любого назначения, отличительной особенностью которых является высокая точность определения координат трубопроводов из любых материалов.

В настоящее время комплексное развитие все более сложной городской подземной инфраструктуры требует актуализации картографического (топографического) материала, так как это является основой эффективного управления земельными участками, на которых расположены объекты инженерной инфраструктуры [5].

Что касается технического состояния значительной части оборудования сетей инженерно-технического обеспечения, оно характеризуется высокой степенью износа в г. Томске. Несмотря на то что в городе Томске с 2003 г. реализуются Программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры, по состоянию на 1 января 2017 г. износ водопроводных сетей г. Томска уже составил 91,3 %. Таким образом, техническое состояние значительной части инженерных сетей в г. Томске на 2017 г. характеризуется высокой степенью износа. Инвестиционная программа по развитию систем водоснабжения и водоотведения на 2011–2015 гг. требовала финансирования в размере 1196,23 млн р., в т. ч. 637,33 млн р.

за счет надбавки к тарифам.

Рассматриваемая проблема имеет и далеко идущие экономические последствия. Объем потерь воды при транспортировке в Российских городах составляет около 8 куб. км в год. Некачественную по своему составу питьевую воду потребляет часть населения в более чем одиннадцати субъектах РФ, в том числе и в Томской области [6].

Современная экономическая обстановка формирует условия для ежегодного роста тарифов на коммунальные услуги. Таким образом, г. Томск остро нуждается в комплексном развитии систем коммунальной инфраструктуры.

В администрации г. Томска не первый год ведут работу по устранению административных барьеров для создания благоприятного инвестиционного климата, как средства обеспечения комфортного уровня жизни населения [7]. К результатам данной работы следует отнести сокращение сроков получения различного рода разрешительной документации в сфере земельно-имущественных отношений для реализации инвестиционных проектов. К ним относится и введенный в действие Закон Томской области № 73-ОЗ от 12.07.2016, устанавливающий случаи, которые не предусматривают получение разрешения на строительство и реконструкцию линейных сооружений для подключения объектов к коммуникациям на территории Томской области.

Рассмотрим более подробно особенности размещения инженерных коммуникаций на территории



г. Томска в системе стратегического и территориального планирования.

#### Анализ градостроительных процедур для размещения линейных объектов

В соответствии с Градостроительным кодексом РФ и Федеральным законом № 172 от 28.06.2014 «О стратегическом планировании в Российской Федерации», развитие систем коммунальной инфраструктуры поселений и городских округов происходит в рамках программ комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры, которые разрабатываются на основании генеральных планов населенных пунктов. Такие программы направлены на обеспечение сбалансированного и перспективного развития систем коммунальной инфраструктуры (электро-, газо-, тепло-, водоснабжение и водоотведение). Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры г. Томска [8, 9] является базовым документом для разработки инвестиционных и производственных программ организаций коммунального комплекса города. Главной задачей такой программы является разработка перечня технических мероприятий по строительству и реконструкции объектов инженерной инфраструктуры, а также прогнозирование развития систем коммунальной инфраструктуры на основе анализа планов застройки и существующей организации систем коммунальной инфраструктуры в городе. Одним из приоритетных этапов таких документов является планирование размещения новых объектов инженерной инфраструктуры и реконструкция существующих, поскольку такие объекты являются частью жизнеобеспечивающей системы населенных пунктов.

Далее запланированное размещение объектов инженерной инфраструктуры детализируется в документах территориального планирования муниципального образования. Таким образом, местоположение инженерной инфраструктуры определяется в соответствии с генеральным планом муниципального образования, правилами землепользования и застройки и проектами планировки и межевания территории.

В контексте градостроительного и земельного законодательства линейные объекты являются разновидностью объектов капитального строительства, но имеют иной правовой режим в части процедур проектирования, строительства на земельном участке, а также реконструкции и ввода их в эксплуатацию.

В соответствии с изменениями [10] в Градостроительном кодексе Российской Федерации (далее Гр.К РФ), вступившими в силу с 1 января 2016 г., выдача разрешения на строительство осуществляется только на основании проекта планировки и проекта межевания территории (далее ПП и ПМТ), предусматривающего размещение объекта инженерной инфраструктуры (линейный объект), за исключением определенных случаев [11].

Учитывая, что на конец 2 квартала 2017 г. количество утвержденных проектов планировки и межевания разработано на 20,85 % территории г. Томска (рис. 1), из них утверждено 16,48 %, внесенные изменения в градостроительном законодательстве усложнили порядок размещения инженерной инфраструктуры на территории г. Томска.

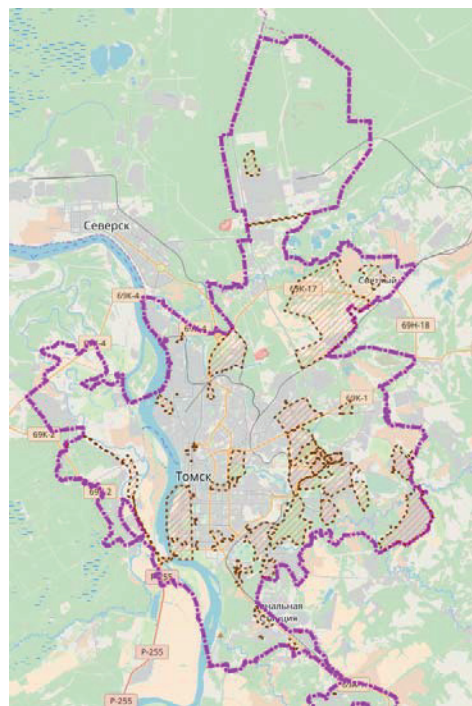


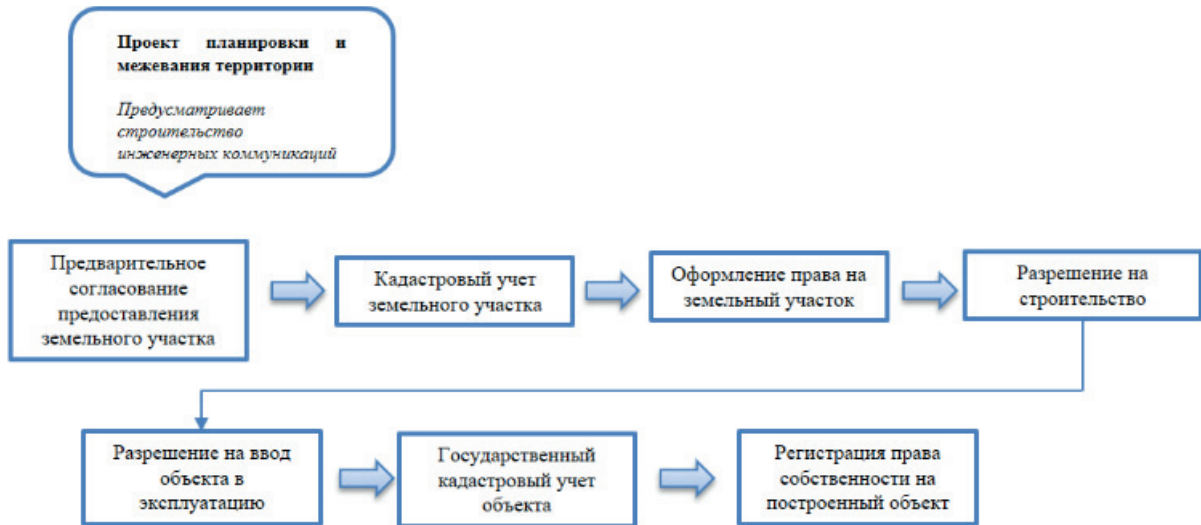
Рис. 1. Границы территории г. Томска, на которую разработаны и утверждены Проекты планировки и межевания территории [12]

Fig. 1. Boundaries of the territory of Tomsk for which the planning and surveying of the territory were developed and approved [12]

В настоящее время на территории г. Томска существует несколько вариантов предоставления земельных участков для размещения инженерных коммуникаций.

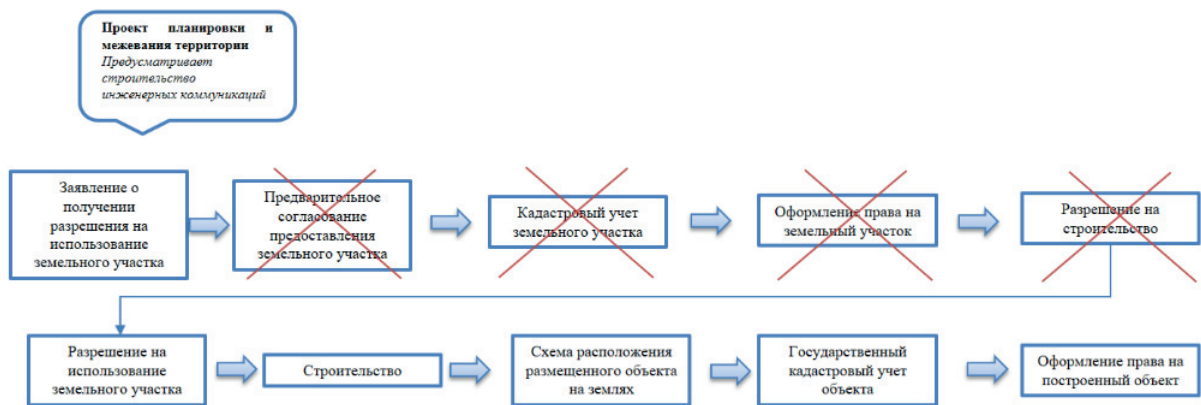
В случае, если строительство объекта предусмотрено утвержденным проектом планировки и проектом межевания территории, заинтересованное лицо обращается в орган администрации г. Томска для образования земельного участка и оформления прав на такой земельный участок и последующего получения разрешения на строительство (рис. 2).

В случае, если строительство объекта предусмотрено утвержденным проектом планировки и проектом межевания территории, а также данный объект входит в перечень объектов, для которых не требуется получение разрешения на строительство на территории Томской области [13], заинтересованное лицо имеет право обратиться в администрацию г. Томска (рис. 3) в целях получения разрешения на использование земель, земельных участков или частей земельных участков, где оформление прав на землю и соответственно получение разрешения на строительство не требуется.



**Рис. 2.** Порядок получения разрешения на строительство линейного объекта, которое предусмотрено утвержденным проектом планировки и проектом межевания территории

**Fig. 2.** Procedure for obtaining a permit for construction of a linear facility, which is provided by the approved design plan and the land surveying project



**Рис. 3.** Порядок действий для размещения линейных объектов на основании разрешения на использования земельных участков

**Fig. 3.** Procedure for placing line objects on the basis of a permit for using land plots

Таким образом, в соответствии с Законом Томской области № 73-ОЗ от 12.07.2016 г. и постановлением администрации Томской области № 263а от 29.07.2016 г., заинтересованное лицо получает разрешение на использование земельных участков. Обязательно к разрешению на использование земельных участков должна быть приложена схема на топографическом плане в масштабе 1:500, где отображены сведения границы и площади земельного участка, на территории которой планируется размещение объекта, а также проектная документация объекта, планируемого к размещению, которая должна содержать в себе основные характеристики объекта: функциональное назначение, состав, внешний вид, площадь, протяженность, материал конструктивных элементов и мощность.

В соответствии с п. 10 ст. 40 ФЗ N 218-ФЗ от 13.07.2015 «О государственной регистрации недвижимости» [14] государственный кадастровый учет и государственная регистрация прав на соз-

данные сооружения, для строительства которых не требуется разрешение, осуществляется на основании документа, подтверждающего возможность размещения таких созданных сооружений без предоставления земельного участка или установления сервитута.

Если объект не входит в перечисленные выше-указанным законом случаи, а на территорию утвержден проект планировки и проект межевания, то заинтересованному лицу необходимо получение разрешения на строительство линейного объекта. Если же планируемый объект не предусмотрен в действующем проекте планировки и проекте межевания территории, необходима отмена действующего проекта планировки и проекта межевания территории и разработка и утверждение нового. При отсутствии утвержденного проекта планировки и проекта межевания территории заинтересованному лицу необходима их разработка и утверждение.

Однако, стоит отметить, что в соответствии с п. 1, 11 Постановления администрации Томской области от 29.07.2016 № 263а, если планируемое размещение объекта не соответствует действующим положениям документов территориального планирования и документации по планировке территории (за исключением размещения временных (некапитальных) объектов) принимается решения об отказе в выдаче такого разрешения. В таком случае, в целях реализации строительства линейных объектов, также необходима отмена действующего проекта планировки и проекта межевания территории и разработка и утверждение нового, что является длительной и дорогостоящей процедурой для заинтересованных в строительстве лиц.

В целях урегулирования и стабилизации сложившейся ситуации на основании градостроительного законодательства Постановлением Правительства РФ № 269 от 07.03.2017 установлен дополнительный перечень случаев, при которых для строительства, реконструкции линейного объекта подготовка документации по планировке территории не требуется.

#### **Обсуждение результатов**

Изменения в Градостроительном кодексе РФ от 1 июля 2017 г. установили обязательную подготовку документации по планировке территории для размещения объекта капитального строительства (строительство и реконструкция линейного объекта). Вместе с тем, Правительством РФ могут быть установлены случаи, при которых для строительства, реконструкции линейного объекта не требуется подготовка документации по планировке территории. Однако, если планируется строительство объекта в границах элемента планировочной структуры, застроенного многоквартирными домами, потребуется разработка проекта планировки и проекта межевания территории. В связи с достаточной протяженностью линейных объектов и прохождению их не только по неразграниченным землям, но и по значительному количеству земельных участков, стоящих на государственном кадастровом учете и обремененных правами третьих лиц, застройщику необходимо их временное пользование. Проекты планировки и межевания территории предусматривают также строительство линейных объектов при установлении сервитутов.

Исчисляемый в соответствии с действующим законодательством срок оформления прав на земельные участки, находящиеся в государственной или муниципальной собственности, предназначенные для размещения линейных объектов, составляет около одного года. При этом действующие нормативные правовые акты обязывают организации, которые размещают линейные объекты, проводить строительство (реконструкцию) объектов для технологического присоединения объектов потребителей в срок до четырех месяцев. Такая раз-

ница в сроках приводит к тому, что значительная часть линейных объектов строится с нарушением установленного порядка [15].

Для решения существующих проблем Правительством подготовлен законопроект, в котором предлагается установить возможность размещения линейных объектов на условиях публичного сервитута. Данное предложение основано на анализе систем регулирования по вопросам размещения инженерных сооружений в зарубежных странах, где предоставляется преимущество при размещении общественно значимых линейных сооружений.

Например, в Швеции закон о размещении инженерных объектов предписывает установление административного сервитута в случае размещения инженерного сооружения общественного пользования. Стоит отметить, что Швеция стала первой страной, где сервитуты трансформировались в отдельные права собственности.

Законы ряда штатов США предписывают обязательное установление сервитутов при размещении инженерных объектов, как условие выдачи разрешения на освоение территории. Отличительной чертой законодательства США о сервитутах от российского законодательства является то, что в США возможно установление сервитутов для инженерных сетей и коммуникаций, а также то, что устанавливается сервитут как в пользу недвижимости (инженерных сетей и коммуникаций), так и в пользу конкретного юридического лица (собственника инженерных сетей и сооружений) [16–18].

В ряде стран бывшего СССР, таких как Белоруссия, Казахстан, частично Украина и Туркменистан, сохранены прежние подходы, наделяющие правом органы власти без согласия правообладателей земельного участка дать разрешение линейным компаниям на размещение объектов.

#### **Выводы**

Эффективность деятельности в сфере градостроительства определяется земельными отношениями, уровнем выработки решений городского планирования в развитие территории, возможностями картографического и геодезического обеспечения и использованием современных информационных технологий. Таким образом, перспективное развитие городских территорий в первую очередь связано с эффективным муниципальным управлением в области земельно-имущественного комплекса. Такое управление подразумевает формирование и развитие благоприятной и комфортной среды обитания, жизнедеятельности и социально-экономической системы.

В результате выполненных исследований выявлено, что государство стремится наиболее рационально организовать процесс образования земельных участков, поскольку именно образование земельного участка на основании проекта межевания территории отвечает принципам устойчивого ра-



звития территорий и осуществления строительства на основании документации по планировке территории, на которых базируется земельное законодательство [19]. Разработка проектов планировки и проектов межевания территории (ППиМТ) подразумевает процесс планирования, что требует определенного анализа факторов, которые влияют на конечное содержание самого ППиМТ, а, следовательно, и на систему локального управления территорией и формирование городского ландшафта.

С другой стороны, неотлаженный механизм планирования и размещения инженерной инфраструктуры на территории г. Томска в условиях реформирования земельного законодательства не позволяют городу гармонично развиваться. Причиной чего является маленькое количество действующих ППиМТ и их качество, потому что они не предусматривают все необходимые инженерные коммуникации на проектируемой территории.

Одной из причин низкого качества ППиМТ можно считать неплановое обновление дежурных планов города в течение многих лет, поскольку они являются топографической основой для разработки таких проектов. Отсутствие большого количества инженерных коммуникаций на дежурных планах г. Томска объясняется отсутствием отлаженной работы по ведению дежурного плана (регламенты, регистрация и контроль исполнения), отсутствием контроля над качеством принимаемых к дежурству материалов, а также необходимостью оплачивать исполнительные съемки по результатам строительства и реконструкции инженерных коммуникаций.

В связи с чем нами предложены первоочередные мероприятия по устранению противоречий в отношении вопросов, связанных с планированием и размещением объектов инженерной инфраструк-

туры в проектах планировки и межевания территории.

Мероприятия предполагают актуализацию сведений по средствам инвентаризации объектов инженерной инфраструктуры на территории г. Томска, в том числе объектов, находящихся в государственной и муниципальной собственности, с нанесением точных границ объектов на дежурные планы города и в электронную базу данных (GeoCad) с содержанием семантической информации согласно классификатору объектов. Формирование инфраструктуры базовых пространственных данных об объектах инженерной инфраструктуры [20, 21], которые являются единственной основой построения муниципальных геоинформационных и кадастровых информационных систем, должно осуществляться с применением новейших гироскопических измерительных систем для определения планово-высотного положения подземных инженерных коммуникаций. Решение данного вопроса потребует достаточно много усилий в части взаимодействия администрации г. Томска с собственниками коммуникаций, в том числе и с ресурсоснабжающими организациями. Сегодня ни одна сетевая организация не имеет полной, актуальной и достаточной информации о планово-высотном положении всех своих подземных инженерных коммуникациях.

Следующим этапом должен встать вопрос о разработке проектов планировки и проектов межевания на всю территорию города уже с учетом сформированного банка данных об имеющихся коммуникациях. И только на третьем этапе необходимо внедрять мероприятия, предусмотренные законопроектом, предусматривающие возможность размещения линейных объектов на условиях публичного сервитута.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснополский Б.Х. Пространственно-экономическое планирование: опыт Великобритании (о докладе «Рамки политики национального планирования») // *Пространственная Экономика*. – 2012. – № 2. – С. 168–173.
2. Корнев В.И., Базавлук В.А., Козина М.В. Анализ состояния стратегического и территориального планирования в Томской области // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2016. – № 4 (57). – С. 55–66.
3. Underground asset location and condition assessment technologies / S.B. Costelloa, D.N. Chapmanb, C.D.F. Rogersb, N. Metjeb // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2007. – V. 22. – P. 524–542.
4. Utility engagement with payments for watershed services in the United States / D.E. Bennett, H. Gosnell, S. Lurie, S. Duncan // *Ecosystem Services*. – 2014. – V. 8. – P. 56–64.
5. Nelson P.P. A framework for the future of urban underground engineering // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2016. – V. 55. – P. 32–39.
6. Ecologization of water-land property matters on the territory of the Tom lower course / V.K. Popov et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – V. 33: Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeocology in Eurasia. – 012057. – 5 p.
7. Решение администрации Томской области № 651 от 30.10.2007 г. «Об утверждении городской программы «Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования «Город Томск» на 2007–2011 гг. и на период до 2025 г.». – Томск, 2007. – 25 с.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1235-р от 27.08.2009 г. «Об утверждении Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» // *Собрание законодательства РФ*. – 2009. – № 36. – Ст. 4147.
9. Решение администрации Томской области № 651 от 30.10.2007 г. «Об утверждении программы комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования «Город Томск» на 2016–2021 гг. и на период до 2030 г.» // *Сборник официальных материалов муниципального образования «Город Томск»*. – 2016. – № 26.3. – 3 с.
10. Федеральный закон № 368-ФЗ от 03.07.2016 «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации» // *Российская газета*. – № 151. – 12.07.2016.
11. Закон Томской области от 09.07.2015 № 100–03 «О земельных отношениях в Томской области» // *Собрание законодательства Томской области*. – 2015. – № 7/2 (127).
12. Градостроительный Атлас города Томска. URL: <https://map.admtomsk.ru> (дата обращения 25.12.2017).
13. Закон Томской области № 73-03 от 12.07.2016 «Об установлении случаев, при которых не требуется получение разрешения



- на строительство на территории Томской области» // Собрание законодательства Томской области. – 2016. – № 15 (181).
14. Федеральный закон № 218-ФЗ от 13.07.2015 (ред. от 29.07.2017) «О государственной регистрации недвижимости» (с изм. и доп., вступ. в силу с 11.08.2017) // Собрание законодательства РФ. – 20.07.2015. – № 29 (Ч. I). – Ст. 4344. URL: [https://map.admtomsk.ru/main/map\\_all.html#!system=tomsk\\_all&bank=1](https://map.admtomsk.ru/main/map_all.html#!system=tomsk_all&bank=1) (дата обращения: 24.10.2017).
  15. Проект федерального закона № 187920-7 «О внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации в части упрощения строительства, реконструкции, капитального ремонта и (или) эксплуатации линейных объектов» (внесен 30.05.2017 Правительством РФ) URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71586906/#ixzz4wQux95aL> (дата обращения: 24.10.2017).
  16. Spencer В.Н. Land use policy and landscape fragmentation in an urbanizing region: assessing the impact of zoning // Journal of Environmental Management. – 2005. – V 25. – P. 121–141.
  17. Brennana Th.M., Venigalla M. A constructability assessment method (CAM) for sustainable division of land parcels // Land Use Policy. – 2016. – V. 56. – P. 47–57.
  18. Norton R.K. Using content analysis to evaluate local master plans and zoning codes // Land Use Policy. – 2008. – V. 25. – P. 432–454.
  19. Корякин В.И. Новое в правовом регулировании размещения линейных объектов // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2016. – № 6 (177). – С. 17–30.
  20. Urban underground infrastructure mapping and assessment / D. Huston, T. Xia, Y. Zhang, T. Fan, D. Orfeo, J. Razinger // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2017. – V. 10168. – № 101680M.
  21. Mapping, assessing and monitoring urban underground infrastructure / D. Huston, T. Xia, D. Burns, D. Orfeo, Y. Zhang, C. Ou // Structural Health Monitoring 2017: Real-Time Material State Awareness and Data-Driven Safety Assurance: Proc. of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2017. – Stanford, United States, 12–14 September 2017. – V. 1. – P. 245–251.

Поступила 09.01.2018 г.

#### Информация об авторах

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

**Студенова К.В.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Козина М.В.**, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556; 330.15; 332.36

## ISSUES OF PLANNING AND FORMING ENGINEERING INFRASTRUCTURE WITHIN THE TERRITORY OF TOMSK IN TERMS OF REFORMING LAND LEGISLATION

**Viktor K. Popov<sup>1</sup>,**

pvk@tpu.ru

**Kseniy V. Studenova,**

gtc@t-sk.ru

**Mariya V. Kozina,**

marijamkozina@gmail.com

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

The research is relevant due to the fact that solution of current reliability and exhaustion problems of engineering facility operation is considered to be one of the main indicators of engineering infrastructure development level as well as the life quality level. The occurring changes severely limit an opportunity for formation and assignment of land parcels for the purpose of engineering facilities construction, whereas these changes are related to fundamental changes of a legal basis of urban activity and land planning. To assess the current situation, a thorough analysis of urban procedures for placing linear objects has been conducted. The issues of identification, modernization and comprehensive development of public infrastructure systems are closely linked to the issues of land-use planning, and this development requires the improvement of technical state of engineering systems as well as actualization of cartographic (topographic) data. The issues at hand are essential for Tomsk. According to this, the paper reveals the issues of planning and formation of engineering infrastructure on the example of Tomsk.

**The aim** of the research is to provide an analysis of the urban development procedures of placing linear objects on urban areas. Another aim is to reveal variants, which can implement the construction of linear objects in terms of significant reforming of urban and land law in respect of placing the linear objects of the engineering infrastructure

**The applied methods** are the theoretical analyses of research, integration, synthesis, comparison, classification, tabular data presentation and expert assessment alongside with other general analytical methods.

As a result of the conducted analysis of the current legislation, the authors formed a system of procedures for linear object placement within the territory of Tomsk and Tomsk region on the basis of admission for land plots use. Beyond this, the authors proposed a system of procedures for linear objects construction permit whereas this construction is envisioned by the planning permission and the land demarcation project. It was determined that the government has given the priority to the planning permission and the land demarcation project in decision-making on issues related to urban land use. The authors proposed the measures on eliminating contradictions with regard to the issues of planning and placing the engineering infrastructure objects in the projects of planning permission and land demarcation providing the high-quality and relevant information on operational plans about all the utilities in Tomsk. The operational plans represent the main basis of the municipal geoinformational and cadastral information systems.

### Key words:

Land relations, planning project, infrastructure, line facility, construction, territorial planning, assessment.

### REFERENCES

1. Krasnopolsky B.Kh. Prostranstvenno-ekonomicheskoe planirovaniye: opyt Velikobritanii (o doklade «Ramki politiki natsionalnogo planirovaniya») [Spatial-economic planning: the experience of the Great Britain (on the report «The framework of the policy of national planning»)]. *Prostranstvennaya Ehkonomika*, 2012, no. 2, pp 168–173.
2. Korenev V.I., Bazavluk V.A., Kozina M.V. Analysis of strategic and land-use planning in Tomsk region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2016, no. 4 (57), pp. 55–66. In Rus.
3. Costelloa S.B., Chapman D.N., Rogers C.D.F., Metjeb N. Underground asset location and condition assessment technologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, pp. 524–542.
4. Bennett D.E., Gosnell H., Lurie S., Duncan S. Utility engagement with payments for watershed services in the United States. *Ecosystem Services*, 2014, no. 8, pp. 56–64.
5. Priscilla P., Nelson A. Framework for the future of urban underground engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 55, pp. 32–39.
6. Popov V.K., Kozina M.V., Levak Yu.Yu., Shvagrakova E.V. Ecologization of water-land property matters on the territory of the Tom lower course. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 012057, 5 p.
7. Reshenie administratsii Tomskoy oblasti № 651 ot 30.10.2007 g. «Ob utverzhdenii gorodskoy programmy «Programma kompleksnogo razvitiya sistem kommunalnoy infrastruktury munitsipalnogo obrazovaniya «Gorod Tomsk» na 2007–2011 gg. i na period do 2025 g» [On the approval of the city program «Program for the integrated development of communal infrastructure utilities infrastructure of the municipal entity»]. Tomsk, 2007. 25 p.
8. Rasporiyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii № 1235-r ot 27.08.2009 g. «Ob utverzhdenii Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda» [On the approval of the Water Strategy of the Russian Federation for the period until 2020]. *Sobranie zakonodatelstva Tomskoy oblasti*, 2009. No. 36.
9. Reshenie administratsii Tomskoy oblasti № 651 ot 30.10.2007g. «Ob utverzhdenii programmy kompleksnogo razvitiya sistem kommunalnoy infrastruktury munitsipalnogo obrazovaniya «Gorod Tomsk» na 2016–2021 gg. i na period do 2030 g.» [On the approval of the program for the integrated development of communal infrastructure systems of the municipal entity «City of Tomsk» for 2016–2021 and for the period up to 2030]. *Sbornik ofitsialnykh materialov munitsipalnogo obrazovaniya «Gorod Tomsk»*, 2016. No. 26.3.

10. Federalny zakon № 368-FZ ot 03.07.2016 «O vnesenii izmeneniy v Gradostroitelny kodeks Rossiyskoy Federatsii» [On Amending the Urban Development Code of the Russian Federation]. *Rossiyskaya gazeta*, 12.07.2016, no. 151.
11. Zakon Tomskoy oblasti ot 09.07.2015 № 100 – OZ «O zemelnykh otnosheniyakh v Tomskoy oblasti» [On land relations in the Tomsk region]. *Sobranie zakonodatelstva Tomskoy oblasti*, 2015, no. 7/2 (127).
12. *Gradostroitelny Atlas goroda Tomsk* [City planning atlas of Tomsk]. Available at: <https://map.admtomsk.ru> (accessed 25 December 2017).
13. Zakon Tomskoy oblasti № 73-OZ ot 12.07.2016 «Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh ne trebuetsya poluchenie razresheniya na stroitelstvo na territorii Tomskoy oblasti» [On the establishment of cases in which it is not required to obtain a building permit on the territory of the Tomsk region]. *Sobranie zakonodatelstva Tomskoy oblasti*, 2016, no. 15 (181).
14. Federalny zakon № 218-FZ ot 13.07.2015 (red. ot 29.07.2017) «O gosudarstvennoy registratsii nedvizhimosti» [On state registration of real estate]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 2015, no. 29 (P. I), article 4344. Available at: [https://map.admtomsk.ru/main/map\\_all.html#!system=tomsk\\_all&bank=1](https://map.admtomsk.ru/main/map_all.html#!system=tomsk_all&bank=1) (accessed 24 October 2017).
15. *Proekt federalnogo zakona № 187920–7 «O vnesenii izmeneniy v nekotorye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii v chasti uproshcheniya stroitelstva, rekonstruktsii, kapitalnogo remonta i (ili) ekspluatatsii lineynykh obektov»* (vnesen 30.05.2017 Pravitelstvom RF) [On Introduction of Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation Concerning the Simplification of the Construction, Reconstruction, Capital Repair and (or) Operation of Line Facilities]. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71586906/#ixzz4wQux95aL> (accessed 24 October 2017).
16. Spencer B.H. Land use policy and landscape fragmentation in an urbanizing region: Assessing the impact of zoning [Land use policy and landscape fragmentation in an urbanizing region: Assessing the impact of zoning]. *Journal of Environmental Management*, 2005, vol. 25, pp. 121–141.
17. Brennana Th.M., Venigalla M. A constructability assessment method (CAM) for sustainable division of land parcels [A constructability assessment method (CAM) for sustainable division of land parcels]. *Land Use Policy*, 2016, vol. 56, pp. 47–57.
18. Norton R.K. Using content analysis to evaluate local master plans and zoning codes [Using content analysis to evaluate local master plans and zoning codes]. *Land Use Policy*, 2008, vol. 25, pp. 432–454.
19. Koryakin V.I. New things in regulatory placement of linear objects. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii*, 2016, no. 6 (177), pp. 17–30. In Rus.
20. Huston D., Xia T., Zhang Y., Fan T., Orfeo D., Razinger J. Urban underground infrastructure mapping and assessment. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2017, no. 101680M.
21. Huston D., Xia T., Burns D., Orfeo D., Zhang Y., Ou C. Mapping, assessing and monitoring urban underground infrastructure. *Structural Health Monitoring 2017: Real-Time Material State Awareness and Data-Driven Safety Assurance. Proc. of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2017*. Stanford, United States, 12–14 September 2017. Vol. 1, pp. 245–251.

Received: 9 January 2018.

#### Information about the authors

**Viktor K. Popov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Kseniy V. Studenova**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mariya V. Kozina**, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 544.653.22

## ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАЛЛАДИЯ В МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУДАХ

Горчаков Эдуард Владимирович<sup>1</sup>,  
gorchakovedvard@mail.ru

Перевезенцева Дарья Олеговна<sup>2</sup>,  
dop@tpu.ru

Вайтулевич Елена Анатольевна<sup>2</sup>,  
rhodamine@tpu.ru

Ким Джин-Чун<sup>3</sup>,  
jckimpml@ulsan.ac.kr

Багамаев Багама Манапович<sup>1</sup>,  
bagamaev60@mail.ru

<sup>1</sup> Ставропольский государственный аграрный университет,  
Россия, 355017 г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12.

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

<sup>3</sup> Университет Улсана,  
Республика Корея, 680749, г. Улсан, ул. Даехакро, 102.

**Актуальность** исследования связана с разведкой новых месторождений благородных металлов и подсчета их запасов, а также с определением содержания палладия в медно-никелевых сульфидных рудах, медных шламах, никелевых концентратах, в отходах различных производств.

**Цель** исследования: поиск оптимальных условий определения палладия в присутствии золота в различных по составу медно-никелевых сульфидных рудах, медных шламах, никелевых концентратах и устранение мешающего влияния золота при вольтамперометрическом определении палладия.

**Методы:** инверсионная вольтамперометрия, атомно-адсорбционная спектрометрия, просвечивающая электронная микроскопия.

**Результаты.** Определены оптимальные условия вольтамперометрического анализа палладия: ультрафиолетовое облучение пробы в присутствии щавелевой кислоты; графитовый индикаторный электрод,  $E_{30} = -0,9$  В,  $t_{30} = 120$  с,  $v = 0,08$  В·с<sup>-1</sup>. Разработана методика определения палладия в золотосодержащих рудах, с помощью которой устранено мешающее влияние золота без изменения концентрационной линейной зависимости высоты анодного максимума ионов палладия от его концентрации и сокращено время вольтамперометрического определения палладия в 3 раза по сравнению со стандартной методикой. Экспериментально показано, что при облучении происходило восстановление соединений золота до элементарного золота в виде наночастиц. В данных условиях наблюдался пропорциональный рост высоты анодного максимума ионов палладия в растворе при увеличении его концентрации в широком диапазоне от концентрации 0,1 до 1000 мг·л<sup>-1</sup>, что свидетельствует об удовлетворительных метрологических характеристиках методики. Показана также удовлетворительная сходимость методик инверсионной вольтамперометрии и атомно-адсорбционной спектрометрии определения палладия: показатель точности (границы погрешности методик) определения без изменения линейной концентрационной зависимости при анализе палладия составляет от 30 до 42 % для инверсионной вольтамперометрии и для атомно-адсорбционной спектрометрии – от 13 до 36 %.

### Ключевые слова:

Палладий, золото, инверсионная вольтамперометрия, ультрафиолетовое облучение, атомно-адсорбционная спектрометрия, просвечивающая электронная микроскопия.

### Введение

Палладий – химический элемент, относящийся к группе платиновых металлов, широко применяемый в химической промышленности, радиоэлектронике, производстве ювелирных изделий и как катализатор. Палладий в природных объектах присутствует как в самородном состоянии, так и в составе интерметаллических соединений, а также является сопутствующим компонентом в медных, серебряных и золотосодержащих рудах и платиновых концентратах. Запасы палладия являются

стратегическим запасом нашей страны. Поэтому для всех металлов платиновой группы необходимо контролировать их содержание в месторождениях, а также в отходах и отвалах добычи и переработки руд для технико-экономического обоснования целесообразности их добычи.

В настоящее время широко используют гостированные методики определения металлов платиновой группы с применением атомно-эмиссионной и атомно-адсорбционной спектрометрии (ААС), диапазон определяемых концентраций которых ле-



жит в интервале от  $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$  мас. % [1–3]. Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволяет определить низкие содержания палладия – до уровня 4 мкг/т соответственно.

Недостатками высокочувствительных спектральных методов анализа золота и палладия являются: малая навеска лабораторной пробы, ее непредставительность, дополнительные операции, связанные с разложением и потерей определяемого элемента [4, 5]. Стандартными процедурами, используемыми при подготовке проб палладия к его спектральному анализу, являются: цианирование [6], выщелачивание [7], применение селективных экстрагентов [8–15]. При этом происходит совместное извлечение и других компонентов пробы, мешающих спектральному определению палладия, что приводит к искажению результатов его определения.

Известны и методики вольтамперометрического определения палладия в растворах фоновых хлоридсодержащих электролитов [14–19], нитратного электролита [20] и в составе неорганических и органических комплексных соединений [21–26]. Инверсионная вольтамперометрия характеризуется несомненными преимуществами определения палладия в рудах и породах: экспрессностью, доступность оборудования, высокой чувствительностью определения микроколичеств палладия менее  $1 \cdot 10^{-4}$  мас. %, низкой погрешностью определения (ошибка определения не превышает 10 %).

При обработке геологических образцов и шламов смесью азотной и соляной кислот (1:3) для дальнейшего перевода металлов в хлоридные комплексы в экстракт переходят палладий и золото. На вольтамперных зависимостях систем золото–палладий и водород–палладий, имеющих близкие значения потенциалов, наблюдается наложение сигналов, что приводит к искажению результатов вольтамперометрического определения палладия. Для устранения мешающего влияния золота и водорода на палладий применяют обработку ультрафиолетовым излучением (УФ-обработку) без и в присутствии органического восстановителя [15, 18, 27]. Цель исследования – поиск оптимальных условий определения палладия в присутствии золота в различных по составу медно-никелевых сульфидных рудах, медных шламах, никелевых концентратах и устранение мешающего влияния золота при вольтамперометрическом определении палладия.

#### Материалы и методы исследования

Для вскрытия минеральных проб, содержащих палладий, использовали предварительно отожженную при  $850^\circ\text{C}$  в течение 1 часа навеску образца массой 1 г. Пробу смачивали небольшим количеством воды, и проводили обработку 10–15 мл концентрированной HF для удаления кремния в виде летучего  $\text{SiF}_4$ . Сухой остаток для перевода палладийсодержащих проб в раствор обрабатывали 20 мл смеси кислот 37 мас. % HCl и 63 мас. %  $\text{HNO}_3$

при соотношении (3:1). После полного растворения пробы проводили выпаривание раствора с последующей обработкой не менее двух раз раствором, содержащим хлорид-ионы для удаления нитрат-ионов и перевода палладия в хлоридный комплекс. Затем добавляли 1 мл 1 % раствора диметилглиоксимата натрия, перемешивали и оставляли на 10 минут для завершения комплексообразования. В полученный раствор приливали 5–10 мл хлороформа, и после легкого встряхивания в течение 1 минуты проводили экстрагирование. Хлороформный экстракт сливали в чистый кварцевый стакан и упаривали до влажного остатка. Затем приливали 1 мл 1 М HCl, нагревали до слабого кипения и доводили раствор до минимального объема, равного 0,3 мл. Полученный объем смеси палладия после подготовки пробы разбавляли до 10 мл дистиллированной воды, помещали в трехэлектродную электрохимическую ячейку, и проводили вольтамперометрическое определение палладия.

Для исследований использовали вольтамперметрический анализатор ТА-4 (Томск) с трехэлектродной ячейкой, в которой в качестве индикаторного электрода использовали графитовый электрод (ГЭ), сажевый электрод (СЭ), стеклографитовый электрод (СГЭ), в качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод (Ag/AgCl/KCl), в качестве вспомогательного электрода также был использован хлоридсеребряный электрод.

Методика определения палладия заключается в следующем. Сначала 10 мл фонового электролита 0,1 М HCl помещали в электрохимическую ячейку, на индикаторный электрод подавали потенциал электролиза  $E_s = -0,9$  В и выдерживали в течение 120 с при постоянном перемешивании. Затем перемешивание прекращали, выдерживали в течение 20 с и регистрировали фоновую кривую. Отсутствие максимумов на вольтамперной кривой в диапазоне изменения потенциалов от 0,2 до 0,8 В свидетельствует об отсутствии металлов в фоновом электролите. Затем добавляли аликвотную часть 1 мл анализируемого раствора, на индикаторный электрод подавали потенциал электролиза  $E_s = -0,9$  В и выдерживали в течение 120 с при постоянном перемешивании. Перемешивание прекращали, выдерживали в течение 20 с и регистрировали вольтамперную зависимость с максимумом при  $E_n = +0,45$  В. Для оценки концентрации палладия в электрохимическую ячейку вносили добавку государственного стандартного образца (ГСО) палладия (II) 0,02 мл из 1 мг/л, перемешивали раствор в течение 120 с с помощью вибрационного перемешивания при потенциале электролиза  $E_s = -0,9$  В. Его перемешивание прекращали, выдерживали в течение 20 с и регистрировали увеличение высоты максимума на анодной ветви вольтамперной зависимости не менее чем в два раза при потенциале  $E_n = +0,45$  В. По высоте его максимума вычисляли концентрацию палладия в растворе по методу добавок.

Если в растворе фонового электролита 0,1 М HCl с добавкой 1 мл аликвотной части анализируемого раствора, помещенной в электрохимическую ячейку, выдержанной при потенциале электролиза  $E_0 = -0,9$  В в течение 120 с, на анодной ветви вольтамперной зависимости наблюдались два максимума золота: при потенциале  $E_n = +0,7$  В и палладия при потенциале  $E_n = +0,45$  В, то в кварцевый стаканчик, содержащий 10 мл 0,1 М HCl добавляли 1 мл 0,2 М раствора щавелевой кислоты с последующей УФ-обработкой в течение 120–300 с, затем регистрировали вольтамперную зависимость с одним максимумом при  $E_n = +0,45$  В. После этого в электрохимическую ячейку вносили добавку ГСО палладия (П) 0,02 мл из 1 мг·л<sup>-1</sup>, перемешивали раствор в течение 120 с с помощью вибрационного перемешивания при потенциале электролиза  $E_0 = -0,9$  В, затем перемешивание прекращали, выдерживали в течение 20 с и регистрировали увеличение высоты максимума на анодной ветви вольтамперной зависимости не менее чем в два раза при потенциале  $E_n = +0,45$  В. По высоте его максимума вычисляли концентрацию палладия в растворе по методу добавок.

Форму частиц и их размер определяли с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием электронного микроскопа «JSM-5500» (Япония). Образцы готовили нанесением капли реакционной системы на медные сетки с углеродной подложкой с последующей сушкой на воздухе.

### Результаты и их обсуждение

Для повышения чувствительности вольтамперометрического определения палладия был проведен выбор индикаторного электрода по составу наполнителя. На рис. 1 представлены вольтамперные зависимости ГСО палладия концентрацией 5 мг/л в растворе на ГЭ (2), СЭ (3) и СГЭ (4) 0,1 М HCl. На анодной ветви вольтамперной кривой, полученной на ГЭ (2), наблюдали анодный максимум палладия при потенциале  $E = +0,45$  В. Высота анодного максимума палладия на ГЭ (2) больше, чем на СЭ (3), поэтому наиболее приемлемым электродом для определения палладия был выбран ГЭ. Применение в качестве фонового электролита 0,1 М HCl позволяет повысить чувствительность определения, как минимум на полпорядка, по сравнению с 0,1 М HNO<sub>3</sub> [17]. Далее для выбранного ГЭ были получены оптимальные условия определения палладия: потенциал электролиза  $E_{эл} = -0,9$  В и время электролиза  $t_{эл} = 120$  с, скорость изменения потенциала  $v = 0,08$  В·с<sup>-1</sup>, при которых регистрируется четко выраженный анодный максимум палладия на вольтамперной зависимости.

В присутствии золота наблюдалось изменение вольтамперных зависимостей палладия, а следовательно, и основных характеристических зависимостей, что показано в работе [17].

Использование УФ в присутствии и в отсутствии щавелевой кислоты приводило к уменьше-

нию мешающего влияния золота при определении палладия вследствие восстановления золота; микрофотографии суспензий представлены на рис. 2.

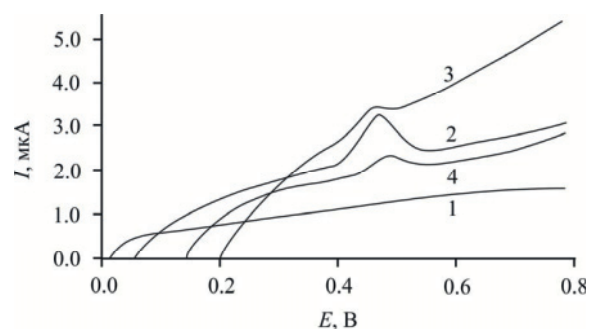
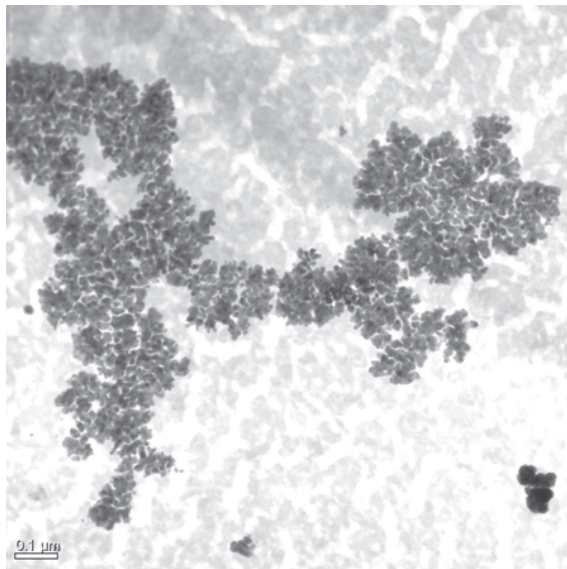


Рис. 1. Вольтамперные зависимости палладия в 0,1 М HCl (1) при скорости изменения потенциала 0,08 В·с<sup>-1</sup>: графитовый электрод (2), сажевый электрод (3), стеклографитовый электрод (4)

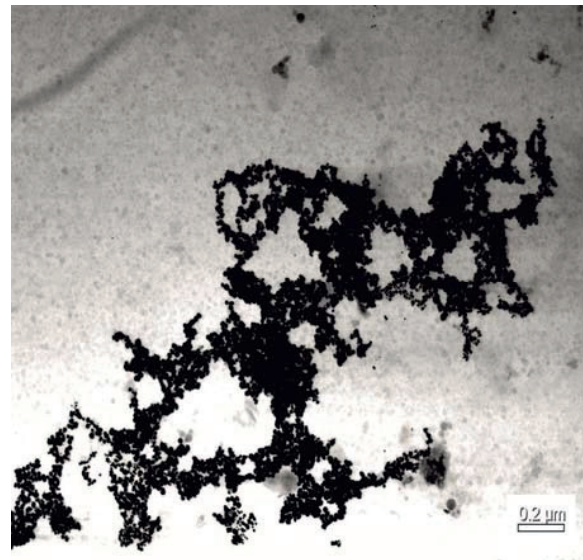
Fig. 1. Current-voltage dependencies of palladium in supporting electrolyte 0,1 M HCl (1), scan rate 0,08 V·s<sup>-1</sup>: graphite electrode (2), black carbon electrode (3), glass graphite electrode (4)

На рис. 2, а представлены металлические агломерированные частицы в форме лепестков и размером порядка от 0,06 до 0,42 мкм, в то же время на микрофотографии (б) присутствуют частицы золота, имеющие шарообразную и овальную формы, характерным размером от 0,17 до 0,5 мкм, которые агломерируются в виде цепочек. Следовательно, при УФ-обработке как в присутствии щавелевой кислоты (перевод в твердую фазу), так и без нее происходило восстановление золота. За счет этого происходило устранение его мешающего влияния при определении палладия.

На рис. 3 представлена логарифмическая зависимость высоты анодного максимума палладия в растворе в зависимости от его концентрации в пределах от 0,1 до 1000 мг·л<sup>-1</sup>. Дальнейшее увеличение концентрации в растворе приводит к нелинейному увеличению высоты анодного максимума палладия и не может быть использовано для аналитического определения палладия. Использование метода добавок или градуировочного графика также невозможно при дальнейшем увеличении концентрации палладия в растворе, что приводит к процессу наводороживания поверхности электрода и к искажению сигнала на вольтамперометрической зависимости. Увеличение концентрации палладия и соляной кислоты (от 1 М и более) приводит к процессу наводороживания палладия, что было показано в работе [19], и согласуется с данными [28]. Уменьшение концентрации соляной кислоты до 0,01 М или ее полное отсутствие приводит также к пассивированию поверхности палладия с образованием оксидных соединений, что было подтверждено в работах [18, 29]. УФ-обработка проб позволила устранить как мешающее влияние золота, так и наводороживание поверхности электрода с предварительно осажденным палладием.



a/a

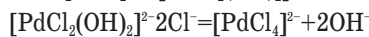
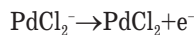
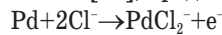


б/б

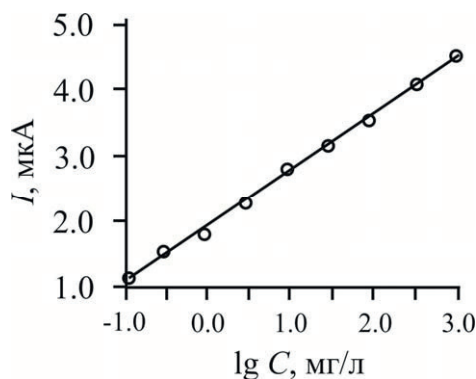
**Рис. 2.** Микрофотографии частиц золота, полученных после обработки ультрафиолетовым излучением в отсутствие органического восстановителя (а) и в присутствии щавелевой кислоты (б)

**Fig. 2.** Microphotography of gold particles obtained after ultraviolet treatment in the absence of an organic reducing agent (a) and in the presence of oxalic acid (b)

Механизм электрорастворения палладия с поверхности ГЭ, согласно [28], представлен на схемах:



$\text{PdCl}_2$  образуется на поверхности электрода (в воде растворим в следовых количествах) с участием двух электронов. Далее хлорид палладия (II) растворяется в воде с образованием гидроксокомплекса с дальнейшим превращением его в растворимый комплексный ион  $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ .

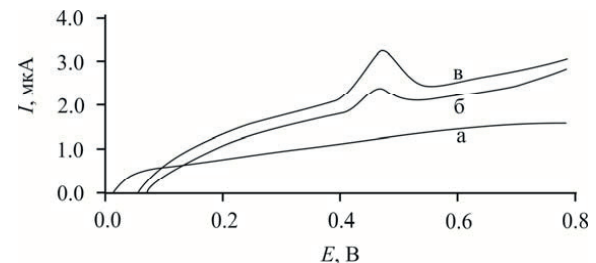


**Рис. 3.** Зависимость высоты анодного максимума палладия от логарифма его концентрации

**Fig. 3.** Function of palladium anode maximum height against the logarithm of its concentration

На рис. 4 приведены типичные вольтамперные зависимости для фоновой кривой (1) и палладия при концентрации  $2 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  (зависимость 2),  $4 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$

(зависимость 3). Показано, что при увеличении концентрации палладия в фоновом электролите  $0,1 \text{ М НСl}$  наблюдается равномерное увеличение высоты анодного максимума при  $E = +0,45 \text{ В}$ .



**Рис. 4.** Вольтамперные зависимости палладия в  $0,1 \text{ М НСl}$  при скорости изменения потенциала  $0,08 \text{ В}\cdot\text{с}^{-1}$  от его концентрации: 1) 0; 2) 2; 3)  $4 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$

**Fig. 4.** Dependence of palladium anode maximum height in supporting electrolyte  $0,1 \text{ М НСl}$ , scan rate  $0,08 \text{ В}\cdot\text{с}^{-1}$  on its concentration: 1) 0; 2) 2; 3)  $4 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$

Правильность данной вольтамперметрической методики была проверена с использованием стандартных образцов, а также атомно-абсорбционного спектрального анализа, используемого как метода сравнения. Проведено определение палладия в различных по составу рудных материалах. Результаты определения палладия представлены в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, наличие в рудном материале золота приводит к искажению результатов определения палладия, полученных с помощью метода инверсионной вольтамперометрии (ИВА). Поэтому для устранения мешающего влияния ионов золота (III) использовано их фото-



**Таблица 1.** Результаты определения палладия в рудах [17]

**Table 1.** Results of palladium determination in ores [17]

Государственный стандартный образец (ГСО) State standard sample (SSS)	Содержание в ГСО, 10 <sup>-4</sup> , мас. % Content in standard samples, 10 <sup>-4</sup> , wt. %	Найдено с использованием инверсионной вольтампе- рометрии, 10 <sup>-4</sup> , мас. % Detected by stripping voltammetry, 10 <sup>-4</sup> , wt. %	Найдено с использованием атомно-адсорбционной спектрометрии, 10 <sup>-4</sup> , мас. % Detected by atomic adsorption spectrometry, 10 <sup>-4</sup> , wt. %
Шлам никелевый ШН ГСО № 2963–84 Nickel slime GSO № 2963–84	1,673	1,349±0,028	1,660
Шлам медный ШМ ГСО № 2962–84 Copper slime GSO № 2962–84	2,78	2,901±0,027	2,690
Хвосты обогащения ХО–1 ГСО № 1703–79 Enrichment tailings GSO № 1703–79	0,84±0,17	0,98±0,02	0,080
Золотосодержащая руда ГСО № 3594–86 Gold-bearing ore GSO № 3594–8	0,0011±0,0001	0,0031±0,0005	0,0010
Руда сульфидная медно-никелевая ГСО 8771–2006 Sulphide copper-nickel ore GSO 8771–2006	16,0±0,4	19,73±1,58	15,8

химическое восстановление в присутствии щавелевой кислоты в растворе фонового электролита 0,1 М НСl. УФ обработка раствора позволила сократить время восстановления ионов золота в 3 раза (10 минут), что повышает экспрессность предложенной методики.

Результаты определения палладия в рудном материале после УФ обработки пробы представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, результаты ИВА определения палладия в рудах, полученные после УФ обработки, хорошо согласуются с результатами определения палладия, полученными атомно-адсорбционным методом анализа (табл. 1), а также с результатами определения палладия с устранением влияния водорода [18] и данными анализа аттестованных стандартных образцов. При контроле сходимости и воспроизводимости расхождения результатов параллельных определений и результатов двух анализов (разность большего и меньшего) с доверительной вероятностью  $P=0,95$  составило от 30 до 42 %, согласно МУ № 3125/08 для инверсионной вольтамперометрии, для атомно-адсорб-

ционной спектрометрии от 13 до 36 %, согласно ГОСТ Р 53372–2009, ГОСТ 55558–2013.

#### Выводы

1. Определены оптимальные условия вольтамперометрического анализа палладия (2+) после ультрафиолетового облучения пробы в присутствии щавелевой кислоты: графитовый индикаторный электрод,  $E_{\text{эл}}=-0,9$  В,  $t_{\text{эл}}=120$  с,  $v=0,08$  В·с<sup>-1</sup>. При данных условиях наблюдается пропорциональное увеличение высоты тока ионов палладия в растворе с ростом его концентрации в широком диапазоне – от 0,1 до 1000 мг·л<sup>-1</sup>, что свидетельствует об ее удовлетворительных метрологических характеристиках.
2. Разработана методика определения палладия в золотосодержащих рудах с использованием предварительной подготовки пробы путем использования ультрафиолетовым облучением в присутствии органического восстановителя. Восстановитель (щавелевая кислота) позволяет устранить мешающее влияние ионов золота за счет образования частиц восстановленного золо-

**Таблица 2.** Результаты вольтамперометрического определения палладия в рудах после обработки пробы ультрафиолетовым излучением [17]

**Table 2.** Results of palladium stripping voltammetry determination in ores after ultraviolet treatment of samples [17]

Государственный стандартный образец State standard sample	Содержание палладия в государственном стандартом образце (ГСО), 10 <sup>-4</sup> , мас. % Content in standard samples, 10 <sup>-4</sup> , wt. %	Найдено с использованием инверсионной вольтамперометрии после обработки ультрафиолетовым излучением, 10 <sup>-4</sup> мас., % Detected using stripping voltammetry, 10 <sup>-4</sup> , wt. %	Sr ( $t_{0,95}$ , $n=20$ )	$\epsilon$ , %
Шлам никелевый ШН ГСО № 2963–84 Nickel slime ShN GSO № 2963–84	1,673	1,349±0,48	0,24	35,6
Шлам медный ШМ ГСО № 2962–84 Copper slime ShM GSO № 2962–84	2,78	2,81±0,27	0,048	9,6
Хвосты обогащения ХО–1 ГСО № 1703–79 Enrichment tailings KhO–1 GSO № 1703–79	0,84±0,17	0,88±0,12	0,068	13,6
Золотосодержащая руда ГСО № 3594–86 Gold-bearing ore GSO № 3594–8	0,0011±0,0001	0,0011±0,0003	0,14	27,3
Руда сульфидная медно-никелевая ГСО 8771–2006 Sulphide copper-nickel ore GSO 8771–2006	16,0±0,4	16,73±0,87	0,026	5,2



- та, что не влияет на линейную зависимость высоты анодного максимума ионов палладия от его концентрации. Причем время вольтамперометрического определения сокращается в 3 раза.
3. Показано образование фрактальных структур золота после обработки ультрафиолетовым облучением проб в присутствии и отсутствии щавелевой кислоты. При восстановлении ионов золота в присутствии щавелевой кислоты образуются фрактальные структуры размером от 0,06 до 0,42 мкм. В отсутствие щавелевой кислоты образуются фрактальные структуры размером от 0,17 до 0,5 мкм.
4. Показана удовлетворительная сходимость методик инверсионной вольтамперометрии и атомно-адсорбционной спектрометрии определения палладия; показатель точности (границы, в которых находится погрешность методики) определения без изменения линейной концентрационной зависимости при определении палладия составляет от 30 до 42 % для инверсионной вольтамперометрии, для атомно-адсорбционной спектрометрии – от 13 до 36 %.

*Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 53372–2009. Золото. Методы анализа. – М.: Стандартинформ, 2009. – 39 с.
- ГОСТ 55558–2013. Руда сульфидная медно-никелевая. Масс-спектрометрический метод определения содержания платины, палладия, родия, рутения, иридия и золота с предварительным коллектированием на никелевый штейн. – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
- Hall G.E.M., Bonham C.G.F. Review of methods to determine gold, platinum and palladium in production oriented geochemical laboratories with application of a statistical procedure to test for bias // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1988. – V. 30. – № 3. – P. 255–289.
- Enzweiler J., Potts P.J. The separation of platinum, palladium and gold from silicate rocks by the anion exchange separation of chloro complexes after a sodium peroxide fusion: an investigation of low recoveries // *Talanta*. – 1995. – V. 42. – № 10. – P. 1411–1418.
- Пчелинцева Н.Ф., Бычков Д.А. Атомно-адсорбционный анализ с электротермической атомизацией и непрерывным источником спектра определения в сульфидоносных породах // *Журнал аналитической химии*. – 2017. – Т. 72. – № 6. – С. 557–561.
- The extraction of platinum and palladium from a synthetic cyanide heap leach solution with strong base anion exchange resins / E. Schoeman, S.M. Bradshaw, G. Akdogan, C.A. Snyders, J.J. Eksteen // *International Journal of Mineral Processing*. – 2017. – V. 162. – P. 27–35.
- Torres R., Lapidus G.T. Platinum, palladium and gold leaching from magnetite ore, with concentrated chloride solutions and ozone // *Hydrometallurgy*. – 2016. – V. 166. – P. 185–194.
- Экстракционно-реэкстракционное концентрирование в системе на основе п-алкиланилина и сульфидов нефти для определения платиновых металлов и золота методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / В.Г. Торгов, Т.М. Корда, М.Г. Демидова, Е.А. Гуськова, Г.Л. Бухбиндер // *Журнал аналитической химии*. – 2009. – Т. 64. – № 9. – С. 901–909.
- Cieszynska A., Wiczorek D. Extraction and separation of palladium (II), platinum (IV), gold (III) and rhodium (III) using piperidine-based extractants // *Hydrometallurgy*. – 2018. – V. 175. – P. 359–366.
- Taher M.A., Daliri Z., Fazilrad H. Simultaneous extraction and preconcentration of copper, silver and palladium with modified alumina and their determination by electrothermal atomic absorption spectrometry // *Chinese Chemical Letters*. – 2014. – V. 25. – P. 649–654.
- Xing W.D., Leea M.S., Kimb Y.H. Separation of gold (III) from hydrochloric acid solution containing platinum (IV) and palladium (II) by solvent extraction with Cyanex 272 and LIX 63 // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2017. – V. 4. – P. 1–7.
- Nguyen Th.H., Sonu Ch.H., Lee M.S. Separation of Pt (IV), Pd (II), Rh (III) and Ir (IV) from concentrated hydrochloric acid solutions by solvent extraction // *Hydrometallurgy*. – 2016. – V. 164. – P. 71–77.
- Shahata A., Sabine Trupp S. Sensitive, selective, and rapid method for optical recognition of ultra-traces level of Hg (II), Ag (I), Au (III), and Pd (II) in electronic wastes // *Sensors and Actuators B*. – 2017. – V. 245. – P. 789–802.
- Kolpakova N.A., Gorchakov E.V., Karachakov D.M. Determination of Palladium by Stripping Voltammetry in Raw Gold Ores // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2009. – V. 64. – № 1. – P. 44–47.
- Вольтамперометрическое и инверсионно-вольтамперометрическое определение платины, палладия и рения в минеральном сырье / Ю.А. Оськина, Е.Г. Пакриева, Э.М. Устинова, Э.В. Горчаков // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2014. – Т. 80. – № 7. – С. 14–18.
- Voltammetric ultra trace determination of palladium (II) in presence of iridium (III) and ruthenium (III) / P. Sharma, S. Sharma, R. Bais, S. Barmera // *International journal*. – 2014. – V. 3. – № 10. – P. 74–78.
- Горчаков Э.В. Инверсионно-вольтамперометрическое определение золота и палладия в золоторудном сырье: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 2008. – 20 с.
- Development of anodic stripping voltammetry for the determination of palladium in high level nuclear waste / T.K. Bhardwaj, H.S. Sharma, P.C. Jain, S.K. Aggarwal // *Nuclear engineering and technology*. – 2012. – V. 44. – № 8. – P. 939–944.
- Elimination of the interfering effect of hydrogen on the determination of palladium by stripping voltammetry / N.A. Kolpakova, S.M. Panova, Yu.A. Os'kina, Zh.K. Sabitova // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2017. – V. 72. – № 12. – P. 1251–1254.
- Naga M.V., Gupta V., Jyothsna M. Determination of copper (II) and palladium (II) by polarographic methods // *International Journal of Scientific and Research Publications*. – 2013. – V. 3. – № 9. – P. 2250–3153.
- Budnikov H.C., Maystrenko V.N., Murinov Yu.I. Electrochemical investigation of palladium complexes with organic sulphides and their use extraction differential pulse polarography // *Talanta*. – 1987. – V. 34. – № 1. – P. 219–222.
- Preconcentration and voltammetric determination of palladium (II) at sodium humate modified carbon paste electrodes / Q. Sun, W. Chu, L. Li, H. Li // *Presenius Journal Analytical Chemistry*. – 1999. – V. 363. – P. 114–117.
- Rojas C.L. Trace determination of palladium in environmental samples by adsorptive voltammetry // *Portugaliae electrochemical acta*. – 2005. – V. 22. – P. 333–352.
- Zarei K., Atabati M., Golmohammadi M. Catalytic determination of ultra trace amounts of palladium by linear sweep voltammetry //

- Journal of Analytical Chemistry. – 2011. – V. 66. – № 7. – P. 646–650.
25. Determination of Pd (II) using an antimony film coated on a screen-printed electrode by adsorptive stripping voltammetry / C. Pérez-Rafols, P. Trechera, N. Serrano, J.M. Diaz-Cruz, C. Ariño, M. Esteban // Talanta. – 2017. – V. 167. – P. 1–7.
26. Shokrollahi A., Ramdar K. Determination of trace amounts of palladium by solutionscanometric method // Journal of Taibah University for Science. – 2017. – V. 11. – P. 782–787.
27. Structure, spectra, and photoinduced electron-redistribution properties of TiO<sub>2</sub>/organic copolymers with gold nanoparticles. A DFT study / A.S. Loginova, S.K. Ignatov, E.P. Chukhmanov, E.V. Salomatina, L.A. Smirnova // Computational and Theoretical Chemistry. – 2017. – V. 1118. – P. 1–15.
28. Genesch J., Victori L. The electrodisolution kinetics of palladium. A note on the effect of chloride ion concentration // Platinum Metals Rev. – 1986. – V. 30. – № 2. – P. 80–83.
29. Anodic dissolution of palladium in sulfuric acid: an electrochemical quartz crystal microbalance study / K. Juodkazis, J. Juodkazyt, B. Ebeke, G. Stalmionis, A. Lukinskas // Russian Journal of Electrochemistry. – 2003. – V. 39. – № 9. – P. 954–959.

Поступила 27.03.2018 г.

#### Информация об авторах

**Горчаков Э.В.**, кандидат химических наук, доцент кафедры терапии и фармакологии Ставропольского государственного аграрного университета.

**Перевезенцева Д.О.**, кандидат химических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вайтулевич Е.А.**, кандидат химических наук доцент отделения естественных наук Школы базовой подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ким Д.-Ч.**, доктор философии (материаловедение), профессор Школы науки о материалах и инженерии университета Улсана.

**Багамаев Б.М.**, доктор ветеринарных наук, профессор кафедры терапии и фармакологии Ставропольского государственного аграрного университета.

UDC 544.653.22

## VOLTAMMETRIC DETERMINATION OF PALLADIUM IN COPPER-NICKEL SULFIDE ORES

**Eduard V. Gorchakov<sup>1</sup>,**  
gorchakovedvard@mail.ru

**Darya O. Perevezentseva<sup>2</sup>,**  
dop@tpu.ru

**Elena A. Vaitulevich<sup>2</sup>,**  
rhodamine@tpu.ru

**Jin-Chun Kim<sup>3</sup>,**  
jckimpml@ulsan.ac.kr

**Bagama M. Bagamaev<sup>1</sup>,**  
bagamaev60@mail.ru

<sup>1</sup> Stavropol State Agrarian University,  
12, Zootekhnicheskii lane, Stavropol, 355017, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> University of Ulsan,  
102, Daehak-ro, Ulsan, 680749, South Korea.

**The research** deals with the need to determine palladium content in copper-nickel sulfide ores, copper sludges, nickel concentrates in the presence of gold in order to study new deposits of noble metals and calculate their reserves, and to determine as well the content of palladium in waste from various industries.

**The aim** of the work was to find the optimum conditions of palladium determination in the presence of gold in copper-nickel sulfide ores, copper sludges, nickel concentrates and to eliminate its interfering influence in palladium voltammetric determination.

**The methods:** stripping voltammetry, atomic adsorption spectrometry, transmission electron microscopy.

**Results.** The authors have defined optimum conditions of palladium determination in ores after ultraviolet irradiation in the presence of oxalic acid. They are as follows: graphite indicator electrode,  $E_{acc} = -0,9$  V,  $t_{acc} = 120$  s,  $v = 0,08$  V·s<sup>-1</sup>. The authors developed the method for determining palladium in gold-bearing ores. The method eliminates the interfering effect of gold without changing the linear dependence of height of anodic maximum of palladium ions on its concentration. Furthermore, palladium voltammetry determination time reduces by three times compared to the standard procedure. The current research has shown that reduction of gold compounds with ultraviolet irradiation occurs to elemental gold in the form of fractal structures. It is demonstrated that the anodic maximum height of palladium ions increases linearly when its concentration changes from 0,1 to 1000 mg·l<sup>-1</sup>. The proposed analytical method has satisfactory metrological characteristics. The accuracy factor of the palladium determination is from 30 to 42 % by stripping voltammetry. It is equal to 13–36 % by atomic adsorption spectrometry.

### Key words:

Palladium, gold, stripping voltammetry, ultraviolet irradiation, atomic adsorption, transmission electron microscopy.

*The research was carried out within the Tomsk Polytechnic University enhancing competitiveness program grants.*

### REFERENCES

1. GOST 53372–2009. Zoloto. Metody analiza [State Standard 53372–2009. Gold. Methods of analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 39 p.
2. GOST 55558–2013. Ruda sulfidnaya medno-nikelevaya. Mass-spektrometrichesky metod opredeleniya sodержaniya platiny, palladiya, rodiya, ruteniya, iridiya i zolota s predvaritelnyim kolektirovaniem na nikelovy shteyn [State Standard 55558–2013. Sulfide copper-nickel ore. Mass-spectrometry method for determination of platinum, palladium, rhodium, ruthenium, iridium and gold content with preliminary collecting for nickel matte]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 24 p.
3. Hall G.E.M., Bonham C.G.F. Review of methods to determine gold, platinum and palladium in production oriented geochemical laboratories with application of a statistical procedure to test for bias. *Journal of Geochemical Exploration*, 1988, vol. 30, no. 3, pp. 255–289.
4. Enzweiler J., Potts P.J. The separation of platinum, palladium and gold from silicate rocks by the anion exchange separation of chloro complexes after a sodium peroxide fusion: an investigation of low recoveries. *Talanta*, 1995, vol. 42, no. 10, pp. 1411–1418.
5. Pchelintseva N.F., Bychkov D.A. Determination of palladium in sulfide-bearing rocks by electrothermal atomization atomic absorption spectrometry with a continuous spectrum source. *The Journal of Analytical Chemistry*, 2017, vol. 72, no. 6, pp. 557–561. In Rus.
6. Schoeman E., Bradshaw S.M., Akdogan G., Snyders C.A., Eksteen J.J. The extraction of platinum and palladium from a synthetic cyanide heap leach solution with strong base anion exchange resins. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 162, pp. 27–35.
7. Torres R., Lapidus G.E. Platinum palladium and gold leaching from magnetite ore, with concentrated chloride solutions and ozone. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 166, pp. 185–194.

8. Torgov V.G., Korda T.M., Demidova M.G. Extraction-re-extraction concentration in the system based on n-alkylaniline and sulfides oil for determination of platinum metals and gold by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. *The Journal of Analytical Chemistry*, 2009, vol. 64, no. 9, pp. 901–909. In Rus.
9. Cieszyńska A., Wiczorek D. Extraction and separation of palladium (II), platinum (IV), gold (III) and rhodium (III) using piperidine-based extractants. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 175, pp. 359–366.
10. Taher M.A., Daliri Z., Fazelirad H. Simultaneous extraction and preconcentration of copper, silver and palladium with modified alumina and their determination by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Chinese Chemical Letters*, 2014, vol. 25, pp. 649–654.
11. Xing W.D., Leea M.S., Kimb Y.H. Separation of gold (III) from hydrochloric acid solution containing platinum (IV) and palladium (II) by solvent extraction with Cyanex 272 and LIX 63. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017, vol. 4, pp. 1–7.
12. Nguyen Th.H., Sonu Ch.H., Lee M.S. Separation of Pt (IV), Pd (II), Rh (III) and Ir (IV) from concentrated hydrochloric acid solutions by solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 164, pp. 71–77.
13. Shahata A., Sabine Trupp S. Sensitive, selective, and rapid method for optical recognition of ultra-traces level of Hg (II), Ag (I), Au (III), and Pd (II) in electronic wastes. *Sensors and Actuators B*, 2017, vol. 245, pp. 789–802.
14. Kolpakova N.A., Gorchakov E.V., Karachakov D.M. Determination of Palladium by Stripping Voltammetry in Raw Gold Ores. *Journal of Analytical Chemistry*, 2009, vol. 64, no. 1, pp. 44–47.
15. Os'kina Yu.A., Pakrieva E.G., Ustinova E.M., Gorchakov E.V. Voltammetric and stripping Voltammetric Determination of Platinum, Palladium, and Rhenium in Mineral Raw Materials. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2014, vol. 80, no. 7, pp. 14–18. In Rus.
16. Sharma P., Sharma S., Bais R., Barmera S. Voltammetric ultra trace determination of palladium (II) in presence of iridium (III) and ruthenium (III). *International journal*, 2014, vol. 3, no. 10, pp. 74–78.
17. Gorchakov E.V. *Inverzionno-voltamperometricheskoe opredelenie zolota i palladiya v zolotorudnom syre*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Stripping voltammetry determination of gold and palladium in gold-bearing raw materials. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2008. 20 p.
18. Bhardwaj T.K., Sharma H.S., Jain P.C., Aggarwal S.K. Development of anodic stripping voltammetry for the determination of palladium in high level nuclear waste. *Nuclear engineering and technology*, 2012, vol. 44, no. 8, pp. 939–944.
19. Kolpakova N.A., Panova S.M., Os'kina Yu.A., Sabitova Zh.K. Elimination of the interfering effect of hydrogen on the determination of palladium by stripping voltammetry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2017, vol. 72, no. 12, pp. 1251–1254.
20. Naga M.V., Gupta V., Jyothsna M. Determination of copper (II) and palladium (II) by polarographic methods. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2013, vol. 3, no. 9, pp. 2250–3153.
21. Budnikov H.C., Maystrenko V.N., Murinov Yu.I. Electrochemical investigation of palladium complexes with organic sulphides and their use extraction differential pulse polarography. *Talanta*, 1987. vol. 34, no. 1, pp. 219–222.
22. Sun Q., Chu W., Li L., Li H. Preconcentration and voltammetric determination of palladium (II) at sodium humate modified carbon paste electrodes. *Fresenius Journal Analytical Chemistry*, 1999, vol. 363, pp. 114–117.
23. Rojas C.L. Trace determination of palladium in environmental samples by adsorptive voltammetry. *Portugaliae electrochemical acta*, 2005, vol. 22, pp. 333–352.
24. Zarei K., Atabati M., Golmohammadi M. Catalytic determination of ultra trace amounts of palladium by linear sweep voltammetry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2011, vol. 66, no. 7, pp. 646–650.
25. Pérez-Ráfols C., Trechera P., Serrano N., Diaz-Cruz J.M., Ariño C., Esteban M. Determination of Pd (II) using an antimony film coated on a screen-printed electrode by adsorptive stripping voltammetry. *Talanta*, 2017, vol. 167, pp. 1–7.
26. Shokrollahi A., Ramdar K. Determination of trace amounts of palladium by solutionscanometric method. *Journal of Taibah University for Science*, 2017, vol. 11, pp. 782–787.
27. Loginova A.S., Ignatov S.K., Chukhmanov E.P., Salomatina E.V., Smirnova L.A. Structure, spectra, and photoinduced electron-redistribution properties of TiO<sub>2</sub>/organic copolymers with gold nanoparticles. A DFT study. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2017, vol. 1118, pp. 1–15.
28. Genesch J., Victori L. The electrodissslution kinetics of palladium. A note on the effect of chloride ion concentration. *Platinum Metals Rev.*, 1986, vol. 30, no. 2, pp. 80–83.
29. Juodkazis K., Juodkazyt J., Ebeka B., Stalnionis G., Lukinskas A. Anodic dissolution of palladium in sulfuric acid: an electrochemical quartz crystal microbalance study. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2003, vol. 39, no. 9, pp. 954–959.

Received: 27 March 2018.

#### Information about the authors

**Eduard V. Gorchakov**, Cand. Sc., associate professor, Stavropol State Agrarian University.

**Darya O. Perevezentseva**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena A. Vaitulevich**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Jin-Chun Kim**, PhD, professor, University of Ulsan.

**Bagama M. Bagamaev**, Dr. Sc., professor, Stavropol State Agrarian University.



УДК 622.276.1/4:55(470.53)

## ОБОСНОВАНИЕ ТРЕНДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ВЫРАБОТКИ ЗАПАСОВ НЕФТИ НИЖНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

**Мухаметшин Вячеслав Вячеславович,**

v@of.ugntu.ru

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

**Актуальность.** В условиях необходимости сохранения достигнутых уровней добычи нефти в стране при смещении структуры запасов в сторону трудноизвлекаемых первоочередной задачей сегодняшнего дня является поиск и обоснование использования передовых высокоэффективных технологий на объектах, характеризующихся высокими значениями остаточных запасов, с целью повышения темпов и степени их выработки.

**Цель:** обоснование трендов повышения эффективности разработки месторождений нижнемеловой системы Западной Сибири на основе идентификации объектов.

**Методы.** Использован геолого-промысловый материал более чем по 300-м объектам исследования. Проведена идентификация по 19-ти параметрам, характеризующим условия залегания, геолого-физические и физико-химические свойства пластов и насыщающих их флюидов с применением методов теории распознавания образа – метода главных компонент, дискриминантного и кластерного анализов.

**Результаты.** Проведено несколько последовательных пошаговых процедур идентификации объектов, позволивших выделить 11 групп объектов и получить аппарат диагностирования принадлежности залежей к той или иной группе с высокой степенью надежности.

**Выводы.** Проведённое исследование позволило: дифференцировать и идентифицировать объекты, приуроченные к нижнемеловой системе Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, с выделением одиннадцати групп объектов по параметрам, оказывающим преобладающее влияние на степень выработки запасов нефти; выделить особенности групп объектов, предложить алгоритмы и несколько направлений поиска идентичных объектов и групп для обоснования трендов повышения эффективности разработки как зрелых месторождений, так и выходящих из разведки, а также не участвовавших в процессе идентификации.

### **Ключевые слова:**

Идентификация, степень выработки запасов, месторождение нефти, повышение эффективности разработки.

### **Актуальность**

Проблеме повышения степени выработки запасов залежей нефти во все времена уделялось самое пристальное внимание как у нас в стране, так и за рубежом [1–6]. Особую значимость эта проблема имеет сегодня в условиях необходимости сохранения достигнутых уровней добычи нефти при существенном изменении структуры запасов нефти [7–9].

Постоянное увеличение количества зрелых месторождений, незначительный объем вновь открываемых запасов, ещё большее смещение центра тяжести добычи полезных ископаемых в районы Крайнего Севера и Арктики, шельфовых зон [10], в районы отсутствия промышленной и бытовой инфраструктуры придают этой проблеме особую актуальность. В большей мере это касается залежей нефти, находящихся в разработке, характеризующихся наличием значительного количества остаточных запасов, расположенных на хорошо обустроенных территориях. Одними из таких объектов являются терригенные месторождения нижнемеловой системы Западной Сибири, находящиеся длительное время в разработке и характеризующиеся относительно невысокими значениями прогнозного конечного коэффициента извлечения нефти (КИН) – в среднем около 30–35 % – при сохранении принципиальных положений существующих систем разработки [11–15]. В то же время раз-

брос значений прогнозного КИН по этим объектам весьма значителен (от 0,1 до 0,6), что является причиной проявления особенностей геологического строения залежей и применяемых, в соответствии с этим, технологий разработки, и требует дифференцированного подхода к дальнейшей разработке объектов различных относительно однородных групп месторождений, а также использования опыта разработки месторождений не только с наибольшей степенью выработки запасов в пределах этих групп [16, 17], но и с незначительными КИН, что позволяет установить несоответствия.

### **Цель**

В связи с этим была поставлена цель: проведение идентификации объектов нижнемеловой системы с выделением степени сходства и различия залежей и их групп по условиям залегания, геолого-физическим и физико-химическим свойствам пластов и насыщающих их флюидов, с созданием алгоритма диагностирования принадлежности залежей к той или иной группе с высокой степенью надежности. Достижение этой цели позволяет:

- обоснованно проводить анализ эффективности разработки объектов в пределах выделенных групп;
- устанавливать причины, ухудшающие процесс выработки запасов нефти;

- устанавливать области наиболее успешного применения тех или иных технологий добычи, а также устанавливать оптимальные параметры этих технологий;
- создавать научно-методическую основу обоснования эффективной разработки объектов-аналогов, вводимых в разработку [18];
- определять геолого-технологические параметры, оказывающие превалирующее влияние на процессы выработки запасов нефти;
- обосновывать использование инновационных и успешных технологий через их тиражирование в пределах групп;
- обеспечивать снижение рисков и повышение эффективности принятия различных управляющих решений при проведении мероприятий по доразработке объектов [19];
- обоснованно использовать прогрессивный опыт разработки объектов, не участвовавших в процессе идентификации [20];
- объективно оценивать эффективность применения новых технологий;
- обосновывать использование передовых технологий для «своих» групп объектов [21];
- обосновывать решения, направленные на извлечение трудноизвлекаемых запасов, снижение затрат на их добычу, увеличение КИН, продление сроков эффективной эксплуатации [22];
- выбирать направления эффективного использования инвестиционного портфеля [23];
- обосновывать выбор полигонов для испытания инновационных технологий;
- эффективно отбирать, обосновывать, использовать сопредельную информацию для извлечения трудноизвлекаемых остаточных запасов;
- рассматривать каждый объект группы как испытательный полигон для других объектов и учитывать положительный и отрицательный опыт его разработки.

Именно идентификация объектов лежит в основе решения обозначенного круга вопросов, направленных на увеличение доли извлекаемых запасов нефти из недр [24–26], и обоснования трендов повышения эффективности разработки объектов нижнемеловой системы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

#### Методы

В качестве объектов исследования было выбрано более 300 объектов разработки – месторождений, их участков и отдельных площадей, приуроченных к Красноленинскому, Сургутскому, Северному, Нижневартовскому сводам; Северо-Вартовской, Северо-Сургутской, Надымской моноклиналям; Ярсомовскому прогибу; Верхнепурскому валу; Большехетской впадине и входящих в состав Фроловской, Среднеобской, Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных областей.

В стратиграфическом плане объекты приурочены к продуктивным пластам альбского (al), ап-

тского (a), баремского (br), готеривского (g), валанжинского (v) ярусов и ачимовской (Ач) толще.

В качестве инструментов достижения поставленной цели использовались алгоритмы из теории распознавания образа: метод главных компонент (МГК), дискриминантный анализ (ДА), кластерный анализ (КА), широко используемые для решения подобного рода задач [27–29].

Идентификация проводилась по девятнадцати параметрам, используемым при проектировании разработки залежей и оказывающим превалирующее влияние на технико-экономические показатели процесса разработки объектов [30, 31]. Среди них:

- параметры, характеризующие условия залегания пластов: глубина залегания ( $H_{зал}$ , м); начальные пластовые давление ( $P_{пл}$ , МПа) и температура ( $t_{пл}$ , °C);
- параметры, характеризующие геолого-физические свойства пластов: общая ( $H_{общ}$ , м) и эффективная нефтенасыщенная ( $H_n$ , м) толщины пласта; коэффициенты пористости ( $m_r$ , д.ед.), нефтенасыщенности ( $K_n$ , д.ед.), проницаемости ( $K_{прон}$ ,  $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>), песчанности ( $K_n$ , д.ед.), расчлененности ( $K_n$ );
- параметры, характеризующие физико-химические свойства пластовых флюидов: плотность ( $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>), вязкость ( $\mu_n$ , мПа·с), относительная вязкость ( $\mu_r$ ) пластовой нефти, объемный коэффициент ( $\beta$ , д.ед.), газосодержание ( $G$ , м<sup>3</sup>/т) и давление насыщения ( $P_{нас}$ , МПа) нефти, содержание сероводорода ( $S$ , %) и парафина ( $P$ , %) в нефти, вязкость пластовой воды ( $\mu_w$ , мПа·с).

Интервалы изменения значений вышеприведенных параметров представлены в табл. 1

#### Результаты

Для снижения размерности пространства при идентификации объектов на первом этапе был использован метод главных компонент. На рис. 1 представлено распределение объектов в осях первых двух главных компонент, которые включают в себя около 50 % общей дисперсии параметров.

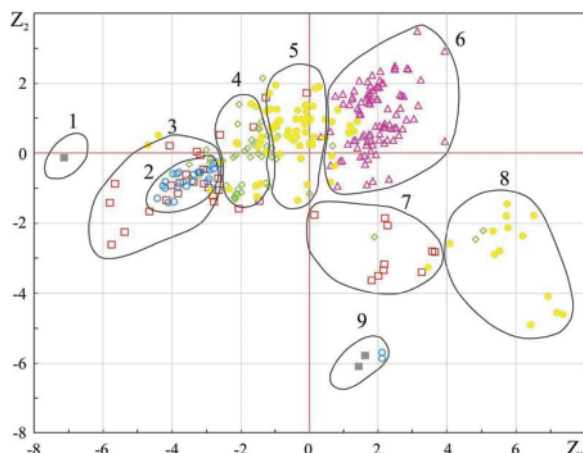
Распределение объектов на рис. 1 позволяет говорить об определенной идентичности объектов в пределах стратиграфических элементов. Так, например, залежи ачимовской толщи сосредоточились в зоне 6, залежи готеривского и аптского ярусов в зонах 4 и 2, соответственно. В то же время объекты, приуроченные к валанжинскому и баремскому ярусам, сосредоточились в двух зонах каждый, соответственно в 5 и 8 и в 3 и 7, что объясняется приуроченностью этих групп к различным тектоническим элементам. Ещё большее различие имеют объекты альбского возраста, приуроченные к Красноленинскому своду и Большехетской впадине (зоны 1 и 9). Необходимо отметить, что залежи аптского возраста близки по рассматриваемым параметрам к отдельным залежам баремского яруса, однако интервалы изменения

**Таблица 1.** Интервалы изменения значений геолого-физических параметров объектов исследования

**Table 1.** Intervals of changing the values of geology and physical parameters of the research targets

Параметр, ед.изм. Parameters, units	$H_{зал}$ , м	$H_{общ}$ , м	$H_3$ , м	$m_r$ , д.ед.	$K_{nr}$ , д.ед.	$K_{прон}$ , $10^{-3}$ МКМ <sup>2</sup>	$K_{пн}$ , д.ед.	$K_p$	$t_{пл}$ , °С	$P_{пл}$ , МПа
Интервал изменения значений Value change interval	1432–3343	2,0–99,2	0,5–18,0	0,12–0,26	0,30–0,68	1–639	0,05–1,00	1–24	53,6–102,0	14,6–33,6
Параметр, ед.изм. Parameters, units	$\mu_{нн}$ , МПа·с	$\rho_n$ , кг/М <sup>3</sup>	$\beta$ , д.ед.	$S$ , %	$P$ , %	$P_{нас}$ , МПа	$G$ , м <sup>3</sup> /т	$\mu_в$ , МПа·с	$\mu_о$	
Интервал изменения значений Value change interval	0,34–5,75	600–920	1,05–1,59	0,07–1,59	0,58–5,95	4,7–24,0	25–280	0,29–0,69	1,00–14,74	

последних гораздо шире, что важно учитывать при идентификации объектов.

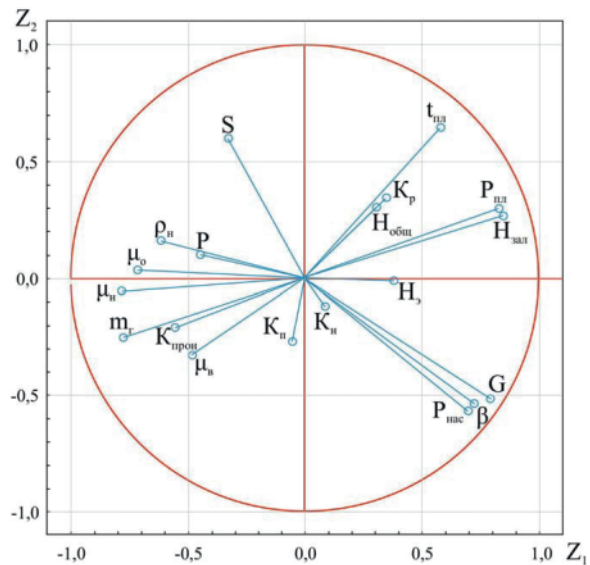


**Рис. 1.** Распределение объектов исследования в осях главных компонент  $Z_1$ – $Z_2$ : Стратиграфическая приуроченность объектов к: ■ – а1; ○ – а; □ – br; ◇ – g; ● – v; △ – Ач; ⊕ – зона сосредоточения объектов по стратиграфическим элементам

**Fig. 1.** Distribution of research targets in the main component  $Z_1$ – $Z_2$  axes: Target's stratigraphic confinement to: ■ – а1; ○ – а; □ – br; ◇ – g; ● – v; △ – Ач; ⊕ – targets concentration zone by the stratigraphic elements

С другой стороны имеют место и исключения, когда отдельные объекты определенного стратиграфического возраста ближе по рассматриваемым характеристикам к объектам другого возраста. Причиной этого является фактор тектоники, нахождение объекта в зоне, близкой к разделу тектонических элементов, законы распределения параметров объектов одноименного возраста. Все эти моменты необходимо учитывать при выделении групп однородных объектов.

Анализ проекций переменных на факторную плоскость главных компонент, представленных на рис. 2, показал, что первая компонента отражает в комплексе условия залегания (вклад  $H_{зал}$  и  $P_{пл}$  – 21 %), вязкостные свойства пластовых флюидов (вклад  $\mu_{нн}$ ,  $\mu_в$ ,  $\mu_о$  – 22,2 %), емкостно-фильтрационные свойства пород-коллекторов (вклад  $m_r$ ,  $K_{прон}$  – 14, 5 %). Вторая в большей мере характеризует температурные условия залегания (вклад  $t_{пл}$  – 17,4 %) и свойства и состав пластовой нефти (вклад  $\beta$ ,  $P_{нас}$ ,  $G$ ,  $S$  – 44 %).



**Рис. 2.** Проекция переменных на факторную плоскость главных компонент

**Fig. 2.** Variables projection to the main component factor plane

В пределах рассматриваемых объектов, как видно из рис. 3, имеют место значимые связи между рассматриваемыми параметрами.

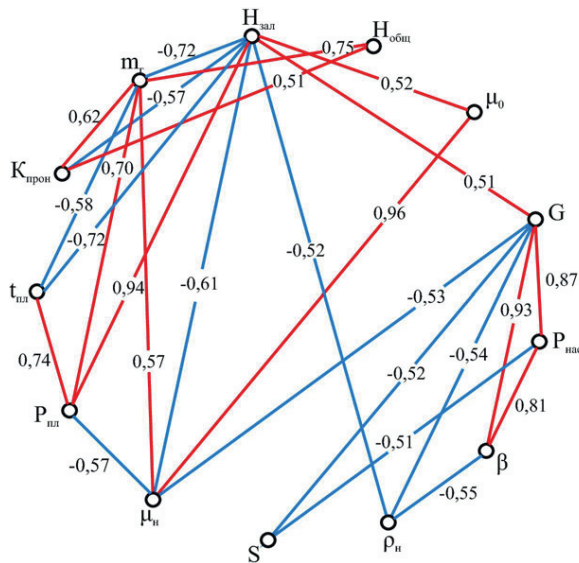
С увеличением глубины залегания пластов закономерно растет пластовое давление и температура. Наряду с этим происходит снижение пористости и проницаемости пород-коллекторов, уменьшение вязкости и плотности и увеличение газосодержания пластовой нефти. Залежи с большими значениями общих толщин пласта характеризуются и большими значениями пористости и проницаемости продуктивных пластов. Наблюдается региональная, достаточно тесная связь пористости и проницаемости нефтенасыщенных пород рассматриваемых объектов.

Приведенные результаты показывают, что поиск идентичных объектов должен проводиться, в первую очередь, на уровне единого стратиграфического элемента. С изменением глубины залегания меняется стратиграфия, геолого-физические свойства пластов и флюидов, условия залегания и вероятность встречи объектов-аналогов искомому существенно снижается.

На втором этапе было выделено около 30 групп объектов по тектонико-стратиграфическому прин-



ципу и проведен дискриминантный анализ, который показал, что около 75 % объектов разделены верно, однако четверть объектов попали в другие группы.



**Рис. 3.** График значимых связей между геолого-физическими параметрами пластов нижнего мела. Шифр прямых – парный коэффициент корреляции

**Fig. 3.** Graph of significant relationships between the geological-physical parameters of the Lower Cretaceous. The straight lines cipher is paired correlation coefficient

На третьем этапе был проведен анализ законов распределения значений дискриминантных функций в пределах групп и между группами, а также анализ объектов, неверно классифицированных.

Было выделено 11 групп объектов с максимальной степенью идентификации, вновь проведен дискриминантный анализ с определением центров группирования (табл. 2) в осях первых двух канонических дискриминантных функций (КДФ), поскольку они включают в себя 74,3 % общей дисперсии параметров.

Количество верно сгруппированных объектов составило 85,3 %, что при решении задач идентификации является довольно высоким показателем.

Уравнения КДФ имеют следующий вид:

$$y_1 = 10,05 - 0,001H_{зал} - 0,025H_{общ} + 0,097H_а - 18,71m_r + 0,377K_n + 0,001K_{прон} + 0,436K_n + 0,033K_p - 0,820t_{пл} + 0,441P_{пл} + 0,670\mu_n + 6,972\rho_n + 0,725\beta - 1,371S + 0,219P + 0,298D_{нас} + 0,042G - 3,781\mu_v - 0,277\mu_o; \quad (1)$$

$$y_2 = -4,28 - 0,005H_{зал} + 0,002H_{общ} + 0,001H_а - 20,62m_r + 3,891K_n + 0,004K_{прон} + 1,090K_n - 0,039K_p + 0,001t_{пл} - 0,191P_{пл} + 0,246\mu_n + 13,19\rho_n + 1,989\beta + 0,191S + 0,558P + 0,250D_{нас} + 0,017G + 9,432\mu_v - 0,050\mu_o. \quad (2)$$

Полученные таким образом идентифицированные группы, уравнения КДФ и определенные центроиды позволяют:

- задавать направление повышения эффективности разработки залежей каждой группы через использование передовых и наиболее результативных технологий разработки объектов, входящих в данную группу;
- использовать эффективные технологии, примененные на месторождениях, не входящих в искомую выборку. При этом достаточно идентифицировать этот объект с выделенными группами путем определения значений КДФ по уравнениям (1), (2) и последующего определения ближайшего центроида в евклидовом пространстве этих дискриминантных функций;
- проводить поиск не только объектов-аналогов, но и групп объектов-аналогов для залежей, находящихся в стадии составления первых проектных документов и ввода в разработку.

Однако самым важным моментом проведенной идентификации является получение возможности обоснования выбора как метода для месторождения, так и месторождения для метода.

Для определения относительной степени идентичности групп выделенных объектов между собой и проверки достоверности полученных результатов на четвертом этапе был проведен кластерный анализ. Результаты анализа, представленные на рис. 4, позволяют определять степень сходства и различия уже выделенных идентифицированных групп и использовать информацию близлежащих групп для решения тех или иных вопросов при управлении разработкой объектов.

Высокие средние значения процента количества объектов групп, вошедших в кластер, от общего количества объектов, вошедших в кластер (77 %), и количества объектов групп, вошедших в кластер, от общего количества объектов в группах (79 %) говорит о высокой степени достоверности проведенной идентификации.

### Выводы

Проведенное исследование позволило:

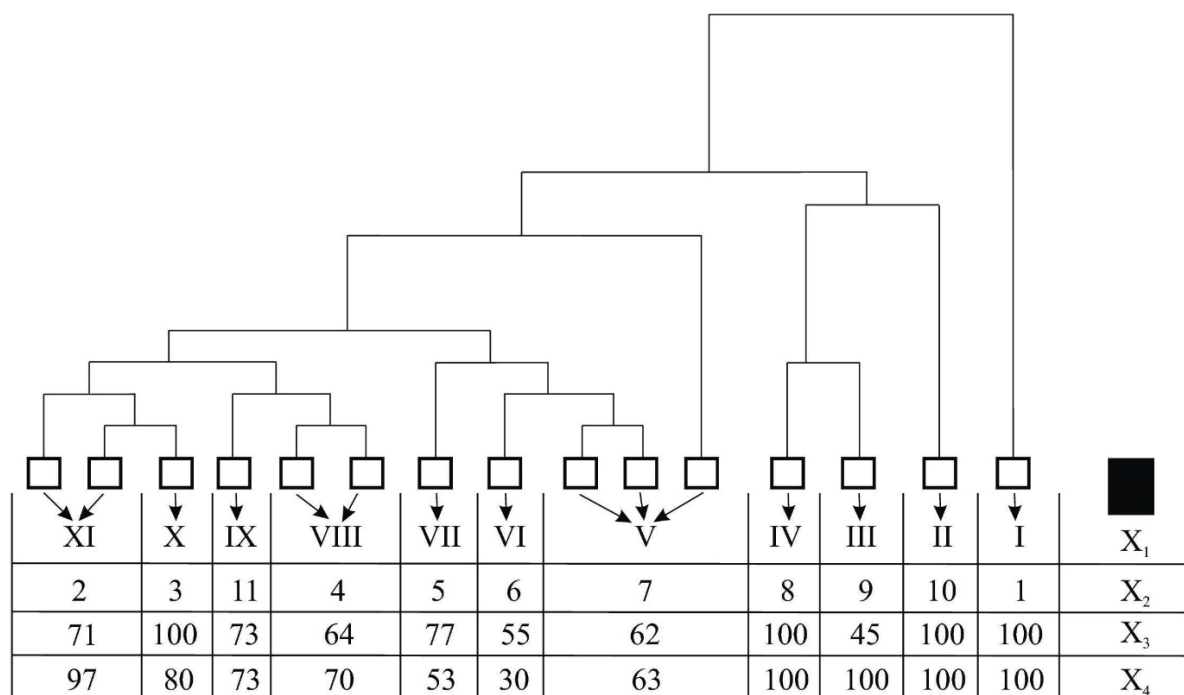
- дифференцировать и идентифицировать более 300 объектов нижнемеловой системы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с выде-

**Таблица 2.** Значения канонических дискриминантных функций в центроидах групп

**Table 2.** Canonical discriminant functions values in group centroids

КДФ CDF	Группа/Group										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$y_1$	-5,72	0,65	3,62	-1,52	-3,23	-1,20	-3,12	9,40	11,36	7,42	8,96
$y_2$	6,34	-2,25	-1,62	-0,49	3,74	0,32	1,95	-4,55	1,21	0,45	5,28





**Рис. 4.** Схема дендрограммы с использованием метода межгрупповых связей: X<sub>1</sub> – номер кластера; X<sub>2</sub> – наиболее представительная группа объектов в кластере; X<sub>3</sub> – процент количества объектов группы, вошедших в кластер от общего количества объектов, вошедших в кластер; X<sub>4</sub> – процент количества объектов группы, вошедших в кластер от общего количества объектов в группе

**Fig. 4.** Chart dendrogram with the group relationship method: X<sub>1</sub> is the cluster number; X<sub>2</sub> is the most representative group of targets in the cluster; X<sub>3</sub> is the percentage of objects that are in the cluster out of the total number of objects in the cluster; X<sub>4</sub> is the percentage of objects that are in the cluster out of the total number of objects in the group

лением одиннадцати групп объектов по параметрам, оказывающим преобладающее влияние на степень выработки запасов нефти;

- выделить особенности групп объектов и предложить аппарат и несколько направлений по-

иска идентичных объектов и групп для обоснования трендов повышения эффективности разработки как зрелых месторождений и выходящих из разведки, так и не участвовавших в процессе идентификации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности. – Казань: ФЭН, 2005. – 688 с.
2. Economides J.M., Nolte K.I. Reservoir stimulation. – West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2000. – 856 p.
3. Sun S.Q., Wan J.C. Geological analogs usage rates high in global survey // Oil & Gas Journal. – 2002. – V. 100. – № 46. – P. 49–50.
4. Муслимов Р.Х. Методы повышения эффективности разработки нефтяных месторождений на поздней стадии // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 3. – С. 30–35.
5. Beliveau D. Waterflooding Viscous Oil Reservoirs // SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Mumbai, India, 2008. – 13 p. DOI: 10.2118/113132-MS.
6. Якупов Р.Ф., Мухаметшин В.Ш. Вопросы эффективности разработки низкопродуктивных карбонатных коллекторов на примере турнейского яруса Туймазинского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 106–110.
7. Дмитриевский А.Н. Ресурсно-инновационная стратегия развития экономики России // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 6–7.
8. Шмаль Г.И. Нефтегазовый комплекс в условиях геополитических и экономических вызовов: проблемы и пути решения // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 8–11.
9. Шпуров И.В., Захаренко В.А., Фурсов А.Я. Дифференцированный анализ степени вовлечения и выработанности запасов юрских залежей в пределах Западно-Сибирской НГП // Недропользование XXI век. – 2015. – № 1 (51). – С. 12–19.
10. Заикин И.П., Кемпф К.В., Набока Р.Р. Перспективы освоения месторождений арктического шельфа РФ // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 81–83.
11. The Usage of Principles of System Geological-Technological Forecasting in the Justification of the Recovery Methods / V.V. Mukhametshin, V.E. Andreev, G.S. Dubinsky, Sh.Kh. Sultanov, R.T. Akhmetov // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 46–51. DOI: 10.5510/OGP20160300288.
12. Выбор объектов и перспективных участков для применения циклического заводнения / М.В. Чертенков, А.И. Чуйко, А.Р. Аубакиров, П.В. Пятибратов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 60–64.
13. Федоров К.М., Тимчук А.С. Анализ эффективности систем разработки нефтяных залежей в юрских отложениях на примере Ершового и Хохряковского месторождений // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2006. – № 3. – С. 11–17.

14. Prospects of Application of Multi-Functional Well Killing Fluids in Carbonate Reservoirs / Yu.V. Zeigman, V.Sh. Mukhametshin, A.R. Khafizov, S.B. Kharina // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 33–39. DOI: 10.5510/OGP20160300286.
15. Ограничение водопритока в горизонтальных скважинах на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами нефти / Р.Р. Кадыров, Р.Х. Низаев, А.Ф. Яргиев, В.В. Мухаметшин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 5. – С. 44–47. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-5-44-47.
16. Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit Productivity Forecast in Carbonate Reservoirs with Hard to Recover Reserves // SOCAR Proceedings. – 2016. – № 3. – P. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
17. Токарев М.А. Комплексный геолого-промысловый контроль за текущей нефтеотдачей при вытеснении нефти водой. – М.: Недра, 1990. – 267 с.
18. Метод экспресс-оценки технологических показателей новых проектов / В.В. Плынин, С.С. Уразов, А.А. Кожемякин, Е.А. Трахачева // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 102–105.
19. Hodgins J.E., Harrell D.R. The Selection, Application, and Misapplication of Reservoir Analogs for the Estimation of Petroleum Reserves // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, 2006. – 15 p. DOI: 10.2118/102505-MS.
20. Norwegian Petroleum Directorate. Ch. 4: Recovery of oil // The petroleum resources on the Norwegian continental shelf / Translated by R. Binns. – Stavanger, Norway: Norwegian Petroleum Directorate, 2005. – P. 30–37.
21. Some Testing Results of Productive Strata Wettability Index Forecasting Technique / R.T. Akhmetov, V.V. Mukhametshin, A.V. Andreev, Sh.Kh. Sultanov // SOCAR Proceedings. – 2017. – № 4. – P. 83–87. DOI: 10.5510/OGP20170400334.
22. Мухаметшин В.В. О необходимости и создании единого комплексного метода геолого-промыслового анализа и обобщения эффективности воздействия на призабойную зону пласта // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 80–84. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-4-80-84.
23. Back M.J., Guercio C. Portfolio Management for Strategic Planning and Operational Optimization // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Florence, Italy, 2010. – 6 p. DOI: 10.2118/134339-MS.
24. Количественные методы использования аналогов в задачах разведки и разработки месторождений / С.И. Кудряшов, Е.Ю. Белкина, М.М. Хасанов, В.А. Павлов, П.А. Тарасов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 43–47.
25. Методический подход к классификации месторождений и поиску месторождений-аналогов / И.О. Орлова, Е.И. Захарченко, Н.К. Скиба, Ю.И. Захарченко // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 12. – С. 16–18.
26. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. – М.: Недра, 1982. – 269 с.
27. Мухаметшин В.В. Устранение неопределенностей при решении задач воздействия на призабойную зону скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 40–50.
28. Behrenbruch P. Waterflood Residual Oil Saturation – The Buffalo Field, Timor Sea // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Brisbane, Australia, 2000. – 15 p. DOI: 10.2118/64282-MS.
29. Zoveidavianpoor M., Samsuri A., Shadizadeh S.R. Development of a Fuzzy System Model for Candidate-well Selection for Hydraulic Fracturing in a Carbonate Reservoir // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. – Mumbai, India, 2012. – 25 p. DOI: 10.2118/153200-MS.
30. Особенности выбора составов жидкостей глушения скважин в осложненных условиях эксплуатации скважин / Ю.В. Зейгман, В.Ш. Мухаметшин, А.Р. Хафизов, С.Б. Харина, Е.М. Абуталипова, А.Н. Авренюк // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 66–69.
31. Геологическое и гидротермодинамическое моделирование месторождений нефти и газа / Р.М. Тер-Саркисов, В.М. Максимов, К.С. Басниев, А.Н. Дмитриевский, Л.М. Сургучев. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 452 с.

*Поступила 16.03.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Мухаметшин В.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.1/4:55(470.53)

## RATIONALE FOR TRENDS IN INCREASING OIL RESERVES DEPLETION IN WESTERN SIBERIA CRETACEOUS DEPOSITS BASED ON TARGETS IDENTIFICATION

Vyacheslav V. Mukhametshin,

vv@of.ugntu.ru

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

**Relevance.** In the conditions of the need to maintain the achieved levels of oil production in the country, with the structure of reserves shifted towards the hard-to-recover, the primary task of today is to find and justify the use of advanced high-efficiency technologies at sites characterized by high residual reserves in order to increase the rate and degree of their production.

**The aim** of the research is the rationale for trends in efficient development of deposits in Western Siberia Lower Cretaceous based on targets identification.

**Methods.** A geological survey material was used in more than 300 research targets. The author has carried out identification basing on nineteen parameters of the mode of occurrence, reservoirs geological, physical and chemical properties and saturating them fluids with the use of image recognition techniques – the principal components method, discriminant and cluster analysis.

**Results.** Several sequential steps have been taken to identify the targets, which enabled eleven groups of targets to be singled out and to obtain a diagnosis means to identify the deposits with a high degree of confidence.

**Conclusions.** The study made it possible to: differentiate and identify targets in connection with the Western Siberian oil province Lower Cretaceous system, with eleven groups of targets in the parameters that have a predominant influence on the oil reserves development degree; highlight the targets groups specifics, suggest algorithms, and find multiple ways to search for identical targets and groups to justify trends in development of both mature and going out-of-exploration and non-participating in the identification process deposits.

### Key words:

Identification, reserve depletion, oil deposit, development intensification.

### REFERENCES

- Muslimov R.Kh. *Sovremennyye metody povysheniya nefteizvlecheniya: proektirovaniye, optimizatsiya i otsenka effektivnosti* [Modern methods of oil recovery increasing: design, optimization and performance evaluation]. Kazan, FEN Publ., 2005. 688 p.
- Economides J.M., Nolte K.I. *Reservoir stimulation*. West Sussex, England, John Wiley and Sons, 2002. 856 p.
- Sun S.Q., Wan J.C. Geological analogs usage rates high in global survey. *Oil & Gas Journal*, 2002, vol. 100, no. 46, pp. 49–50.
- Muslimov R.Kh. Methods of increasing oil fields development efficiency at a late stage. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2008, no. 3, pp. 30–35. In Rus.
- Beliveau D. Waterflooding Viscous Oil Reservoirs. *SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Mumbai, India, 2008. 13 p. DOI: 10.2118/113132-MS.
- Yakupov R.F., Mukhametshin V.Sh. Issues of efficiency of exploring low-productivity carbonate reservoir on the example of Turnaian stage of Tuymazinskoye field. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2013, no. 12, pp. 106–110. In Rus.
- Dmitrievsky A.N. Resource-innovative strategy for development of the Russian economy. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 5, pp. 6–7. In Rus.
- Shmal G.I. Oil and gas complex in response to geopolitical and economic challenges: problems and solutions. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 5, pp. 8–11. In Rus.
- Shpurov I.V., Zakharenko V.A., Fursov A.Ya. Differentiated analysis of involvement degree and depletion of stocks of Jurassic deposits in the Western Siberian oil-and-gas province. *Nedropolzovanie XXI vek*, 2015, no. 1 (51), pp. 12–19. In Rus.
- Zaikin I.P., Kempf K.V., Naboka R.R. Prospects of developing the fields of Russian arctic shelf. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 11, pp. 81–83. In Rus.
- Mukhametshin V.V., Andreev V.E., Dubinsky G.S., Sultanov Sh.Kh., Akhmetov R.T. The Usage of Principles of System Geological-Technological Forecasting in the Justification of the Recovery Methods. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 46–51. DOI: 10.5510/OGP20160300288.
- Chertenkov M.V., Chuiko A.I., Aubakirov A.R., Pyatibratov P.V. Zones and regions selecting for cyclic waterflooding. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 8, pp. 60–64. In Rus.
- Fedorov K.M., Timchuk A.S. Analiz effektivnosti sistem razrabotki neftyanykh zalezhey v yurskikh otlozheniyakh na primere Ershovogo i Khokhryakovskogo mestorozhdeniy [Analysis of effectiveness of oil deposits development systems in Jurassic sediments in Ershovo and Hohrjakov oil fields]. *Izvestiya VUZov. Neft i gaz*, 2006, no. 3, pp. 11–17.
- Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B. Prospects of Application of Multi-Functional Well Killing Fluids in Carbonate Reservoirs. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 33–39. DOI: 10.5510/OGP20160300286.
- Kadyrov R.R., Nizaev R.Kh., Yartiev A.F., Mukhametshin V.V. Novel water shut-off technique for horizontal wells at fields with hard-to-recover oil reserves. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 5, pp. 44–47. In Rus. DOI: 10.24887/0028–2448–2017–5–44–47.
- Andreev A.V., Mukhametshin V.Sh., Kotenev Yu.A. Deposit Productivity Forecast in Carbonate Reservoirs with Hard to Recover Reserves. *SOCAR Proceedings*, 2016, no. 3, pp. 40–45. DOI: 10.5510/OGP20160300287.
- Tokarev M.A. *Kompleksnyy geologo-promyslovyy kontrol za tekushchey nefteotdachey pri vytesnenii nefii vodoy* [Integrated geological production control of current oil recovery in case of oil displacement by water]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 267 p.
- Plynin V.V., Urazov S.S., Kozhemyakin A.A., Trakhacheva E.A. Method of express-evaluation of technological parameters of new projects. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 9, pp. 102–105. In Rus.
- Hodgin J.E., Harrell D.R. The Selection, Application, and Misapplication of Reservoir Analogs for the Estimation of Petroleum Reserves. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, 2006. 15 p. DOI: 10.2118/102505-MS.
- Norwegian Petroleum Directorate. *Ch. 4: Recovery of oil. In: The petroleum resources on the Norwegian continental shelf*. Translated by R. Binns. Stavanger, Norway, Norwegian Petroleum Directorate, 2005. pp. 30–37.

21. Akhmetov R.T., Mukhametshin V.V., Andreev A.V., Sultanov Sh.Kh. Some Testing Results of Productive Strata Wettability Index Forecasting Technique. *SOCAR Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 83–87. DOI: 10.5510/OGP20170400334.
22. Mukhametshin V.V. The need for creation of a unified comprehensive method of geological and field analysis and integration of data on effective influence on the bottom-hole formation zone. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 4, pp. 80–84. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-4-80-84.
23. Back M.J., Guercio C. Portfolio Management for Strategic Planning and Operational Optimization. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, 2010. 6 p. DOI: 10.2118/134339-MS.
24. Kudryashov S.I., Belkina E.Yu., Khasanov M.M., Pavlov V.A., Tarasov P.A. Quantitative approach of using the analogs in exploration and field development. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 4, pp. 43–47. In Rus.
25. Orlova I.O., Zakharchenko E.I., Skiba N.K., Zakharchenko Yu.I. Metodicheskiy podkhod k klassifikatsii mestorozhdeniy i poisku mestorozhdeniy-analogov [Methodical approach to fields classification and fields-analogues prospecting]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2014, no. 12, pp. 16–18.
26. Belonin M.D., Golubeva V.A., Skublov G.T. *Faktornyy analiz v geologii* [Factor analysis in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 269 p.
27. Mukhametshin V.V. Eliminating uncertainties in solving bottom hole zone stimulation tasks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 40–50. In Rus.
28. Behrenbruch P. Waterflood Residual Oil Saturation – The Buffalo Field, Timor Sea. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Brisbane, Australia, 2000. 15 p. DOI: 10.2118/64282-MS.
29. Zoveidavianpoor M., Samsuri A., Shadizadeh S.R. Development of a Fuzzy System Model for Candidate-well Selection for Hydraulic Fracturing in a Carbonate Reservoir. *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. Mumbai, India, 2012. 25 p. DOI: 10.2118/153200-MS.
30. Zeigman Yu.V., Mukhametshin V.Sh., Khafizov A.R., Kharina S.B., Abutalipova E.M., Avrenyuk A.N. Peculiarities of selecting well-killing fluids composition for difficult conditions. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2017, no. 1, pp. 66–69. In Rus.
31. Ter-Sarkisov R.M., Maksimov V.M., Basniev K.S., Dmitrievskiy A.N., Surguchev L.M. *Geologicheskoe i gidrotermodynamicheskoe modelirovanie mestorozhdeniy nefi i gaza* [Geological and hydrothermodynamical modelling of oil and gas fields]. Moscow; Izhevsk, Institut kompyuternykh issledovaniy Publ., 2012. 452 p.

Received: 16 March 2018.

#### Information about the authors

**Vyacheslav V. Mukhametshin**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.



УДК 665.66.081.2

## АДСОРБЦИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ ИОНОВ НА МИНЕРАЛЬНОМ СОРБЕНТЕ

Юрмазова Татьяна Александровна<sup>1</sup>,  
yur-tatyana@yandex.ru

Шахова Нина Борисовна<sup>1</sup>,  
nina.b.shakhova@gmail.com

Чан Туан Хоанг<sup>1</sup>,  
cungbinh9327@gmail.com

Планкина Марина Викторовна<sup>2</sup>,  
kirpl57@mail.ru

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

<sup>2</sup> Томский промышленно-гуманитарный колледж,  
Россия, 634049, г. Томск, ул. Мичурина, 4.

**Актуальность исследования.** В настоящее время среди различных методов очистки питьевых и сточных вод большое распространение получил сорбционный метод. Стремление повысить экономичность сорбционных процессов очистки воды делает актуальной проблему разработки, изучения механизма сорбции и практического применения эффективных и достаточно дешевых минеральных сорбентов.

**Цель работы:** изучить сорбционные возможности минерального сорбента трепела по отношению к водорастворимым нефтепродуктам и ионам  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , а также исследовать механизм адсорбции для дальнейшего практического использования трепела в качестве сорбента в процессах водоочистки.

**Объект:** природный минеральный сорбент – трепел Зикеевского месторождения Калужской области.

**Методы:** рентгенофазовый анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, метод тепловой десорбции азота, индикаторный метод.

**Результаты.** Проведено исследование физико-химических характеристик трепела различными методами, такими как рентгеновский фазовый анализ, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и метод тепловой десорбции азота. Было определено время контакта, удельная поверхность, удельный объем пор минерального сорбента. Определены кинетические параметры процесса адсорбции. Получены изотермы сорбции нефтепродуктов и ионов  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  на минеральном сорбенте – трепеле. Все изотермы были обработаны в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. С помощью индикаторного метода установлен отрицательный заряд активных центров поверхности трепела. Показано, что модификация минерального сорбента трепела приводит к увеличению адсорбционной способности по отношению к ионам  $H_2AsO_4^-$ . Проведенное исследование показало, что минеральный сорбент трепел может использоваться в практике водоочистки в качестве экономически эффективного, безопасного и надежного сорбента при удалении нефтепродуктов и катионов  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ .

### Ключевые слова:

Адсорбция, водорастворимые нефтепродукты, неорганические ионы, минеральный сорбент трепел, заряд поверхности.

### Введение

В последние годы водоочистка становится одним из самых актуальных распространенных технологических процессов. В основе существующих технологий очистки воды от органических и неорганических ионов зачастую лежат электроразрядные методы, мембранные технологии, процессы осаждения, окисления, коагуляции и как правило данные процессы и технологии не всегда позволяют извлечь ионы до уровня ПДК. В настоящее время сорбционные методы являются самыми распространенными среди различных методов очистки питьевых вод [1–11].

В связи со стремлением удешевить сорбционные процессы водоочистки весьма перспективным представляется применение природных минеральных сорбентов, таких как магнетит, мел, антрацитовая крошка, цеолит, кварцевый песок, диатомит, трепел, доломит, опока, месторождения кото-

рых имеются на территории РФ. Данные природные сорбенты находят всё большее применение вследствие их низкой стоимости и высокой сорбционной емкости [12, 13], поэтому их использование в процессе очистки воды позволяет исключить стадию регенерации адсорбента [12]. Обзор публикаций по сорбционным процессам показал, что разработка и применение новых материалов, обладающих повышенными сорбционными свойствами, является актуальной задачей и требует более детального исследования механизма сорбции [1–13].

Но зачастую минеральные сорбенты не обладают нужными сорбционными свойствами и их необходимо подвергать термической обработке или химически модифицировать [3, 7, 8, 14]. В результате модифицирования увеличивается число активных центров поверхности и при этом повышается максимальная сорбционная емкость в от-

личие от исходного минерала в несколько раз. В работе [8] исследована модификация трепела путем создания на поверхности его частиц гидрофобного слоя для повышения нефтепоглощительной емкости трепела; в работе [7] показана модификация сорбента путем введения ионногенных групп для снижения жесткости воды, в работах [15, 16] проведено изучение влияния ультразвуковой обработки и термической и СВЧ модификации трепела на изменение его сорбционных свойств, однако в данных работах не приводится объяснение механизма процесса сорбции.

Данная статья посвящена исследованию сорбционных возможностей минерального сорбента – трепела – по отношению к водорастворимым нефтепродуктам и ионам  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , а также исследованию механизма адсорбции для дальнейшего использования трепела в качестве сорбента в процессах водоочистки. Кроме того, проведена модификация трепела оксигидроксидом железа для увеличения сорбционной емкости по мышьяку.

### Экспериментальная часть

#### Сорбент

В качестве природного сорбента выбран минеральный сорбент трепел Зикеевского месторождения Калужской области. Минеральный сорбент трепел использовался в процессах сорбции без предварительной подготовки. Химический состав минерального сорбента трепела определяли с использованием метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, на приборе iCAP 6300 Duo ThermoScientific (США).

Фазовый состав трепела определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с  $\text{CuK}_\alpha$ -излучением (Germany). Компьютерную базу данных рентгеновской порошковой дифрактометрии PDF4+ Международного центра дифракционных данных (ICDD, Denver, USA) использовали для качественного анализа фазового состава трепела. Удельную поверхность ( $S_{уд}$ ) трепела определяли методом тепловой десорбции азота с использованием прибора Sorbi-3M (Russia). Исследования размеров и формы частиц трепела проводились на растровом электронном микроскопе JMC-6000 (Japan).

#### Исследование процесса адсорбции

Для определения кинетических параметров процесса сорбции проводили процесс сорбции в статическом режиме при различном времени контакта.

Брали одинаковые навески сорбента массой ( $m$ ) 0,05 г, которые заливали 50 мл раствора ( $V$ ) с одинаковой исходной концентрацией нефтепродуктов 50 мг/л и ионов  $\text{Fe}^{3+}$  20 мг/л ( $C_0$ ). Через разное время сорбции раствор центрифугировали на центрифуге «Allegra 64R» (USA). Остаточную концентрацию нефтепродуктов определяли на флюорате 02–3М (Россия), а остаточную концентрацию ио-

нов железа в растворе определяли на спектрофотометре «ArelPD-303UV» (Japan).

Модельные растворы, содержащие водорастворимые нефтепродукты, готовили из ГСО 5 мг «Экметс» (Россия). Модельные растворы, содержащие неорганические ионы  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ , готовились из солей  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{AsO}_4$  с исходной концентрацией 100 мг/л. Для получения изотерм сорбции навески сорбента массой ( $m$ ) 0,05 г заливали 50 мл раствора ( $V$ ) с различной концентрацией ( $C_0$ ) адсорбатов. При достижении сорбционного равновесия раствор отделяли от сорбента центрифугированием при 10000 об./мин. на центрифуге «Allegra 64R» (USA) и определяли равновесные концентрации адсорбатов ( $C_p$ ). Концентрацию водорастворимых нефтепродуктов определяли на флюорате 02–3М (Россия) флуориметрическим методом, который основан на экстракции их гексаном и измерении интенсивности флуоресценции. Концентрации неорганических ионов определяли на спектрофотометре «ArelPD-303UV» (Japan) с соответствующими реактивами:  $\text{Ni}^{2+}$  с диметилглиоксимом ( $\lambda=440$  нм),  $\text{Cr}^{6+}$  с дифенилкарбазидом ( $\lambda=540$  нм),  $\text{As}^{5+}$  с молибдатом аммония ( $\lambda=740$  нм),  $\text{Fe}^{3+}$  с сульфосалициловой кислотой ( $\lambda=540$  нм) в кислой среде [17].

Сорбционную емкость  $A_e$  ( $\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$ ) рассчитывали по формуле (1):

$$A_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}, \quad (1)$$

где  $A_e$  – сорбционная емкость,  $\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$ ;  $C_0$  – исходная концентрация,  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ ;  $C_e$  – равновесная концентрация,  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ ;  $V$  – объем, л;  $m$  – масса, г.

Для определения кинетических параметров использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка. Уравнение псевдо-первого порядка имеет вид (1):

$$\ln(A_e - A_t) = \ln(A_e) - k_1 t, \quad (2)$$

где  $k_1$  – константа скорости уравнения псевдо-второго порядка,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $A_e$  и  $A_t$  – сорбционные емкости при равновесии и времени  $t$ , соответственно.

Уравнение псевдо-второго порядка имеет следующий вид:

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{t}{A_e}, \quad (3)$$

где  $k_2$  – константа скорости уравнения псевдо-второго порядка,  $\text{г}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$ .

Для изучения механизма сорбции проведена обработка изотерм в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха [18], которые представлены в уравнениях (4), (5) соответственно

$$\frac{C_e}{A_e} = \frac{C_e}{A_{\max}} + \frac{1}{A_{\max} b}; \quad (4)$$

$$\ln(A_e) = \frac{1}{n} \ln(C_e) + \ln(K_F), \quad (5)$$

где  $A_{\max}$  – максимальная сорбционная емкость,  $\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$ ;  $b$  – константа уравнения Ленгмюра, связан-

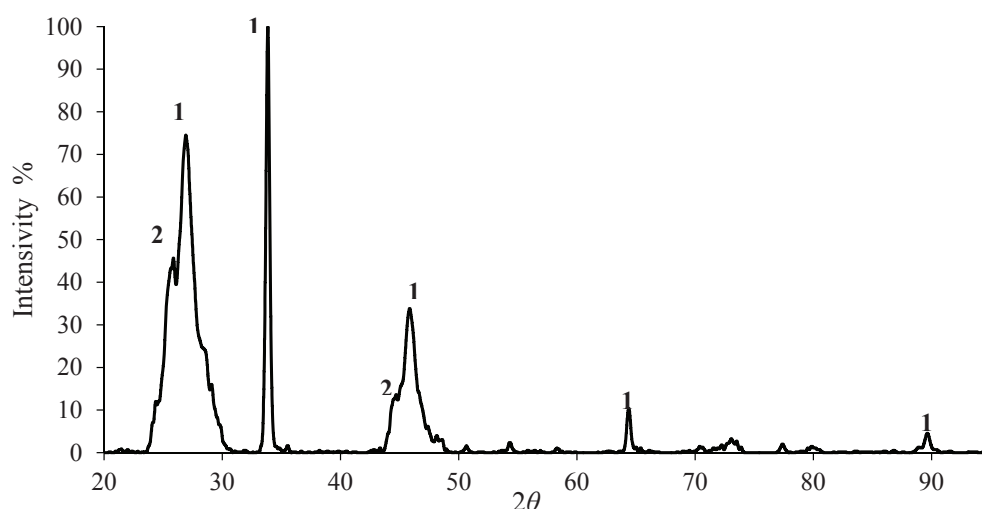


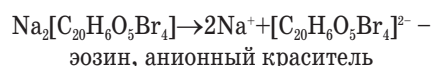
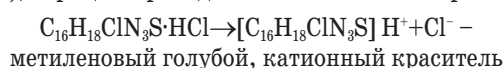
Рис. 1. Рентгенограмма трепела: 1 –  $\beta$ -кварц; 2 –  $\beta$ -кристобаллит

Fig. 1. XRD patterns of tripoli: 1 –  $\beta$ -quartz; 2 –  $\beta$ -cristobalite

ная с адсорбционной энергией  $\text{л} \cdot \text{мг}^{-1}$ ;  $K_f$  и  $n$  – константы уравнения Фрейндлиха.

Влияние поверхностного заряда трепела на его сорбционные свойства

Для определения влияния поверхностного заряда трепела на его сорбционные свойства был применен индикаторный метод. В качестве индикаторов были выбраны: анионный краситель эозин, катионный краситель метиленовый голубой (МГ), сорбция проводилась в статическом режиме.



Кроме того, был измерен  $\zeta$ -потенциал исходного трепела на приборе Zetasizer Nano ZS (Германия), а также потенциал трепела с различным количеством адсорбированного метиленового голубого на трепеле.

Влияние химической модификации поверхности трепела на его сорбционные свойства

С целью увеличения сорбционной емкости по отношению к  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  проводилась химическая модификация поверхности трепела оксигидроксидом железа ( $\text{FeOOH}$ ).

Эксперимент по химической модификации поверхности трепела проводили путем обработки трепела раствором хлорида железа (III) с последующей обработкой раствором гидроксида натрия при температуре  $50^\circ\text{C}$ . Для этого в растворы с различной концентрацией хлорида железа (III) ( $20$ – $100$  мг/л) опускали  $10$  г трепела и выдерживали  $2$  часа. После этого раствор декантировали и трепел с адсорбированными ионами  $\text{Fe}^{3+}$  обрабатывали раствором  $\text{NaOH}$  при температуре  $50^\circ\text{C}$ . Затем снова раствор декантировали и модифициро-

ванный оксигидроксидом железа ( $\text{FeOOH}$ ) образец трепела промывали дистиллированной водой до достижения рН  $6,5$ – $7,2$  и сушили при  $100^\circ\text{C}$ .

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования химического состава адсорбента методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой показали следующий состав трепела (%):  $\text{SiO}_2$  –  $89$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $3,9$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  –  $2,38$ ;  $\text{CaO}$  –  $0,69$ ;  $\text{MgO}$  –  $0,44$ , прочие компоненты  $3,59$ . На рис. 1 приведены результаты РФА, из которых видно, что основной фазой является  $\text{SiO}_2$ .

Удельная поверхность и удельный объем пор трепела составили  $94,6$   $\text{м}^2/\text{г}$  и  $0,011$   $\text{см}^3/\text{г}$  соответственно. На рис. 2 приведена микрофотография ( $\times 500$  – кратное увеличение) образца сорбента трепела до сорбции, который представляет собой полидисперсный порошок, с размерами частиц в диапазоне  $0,2$ – $20$   $\mu\text{м}$ .

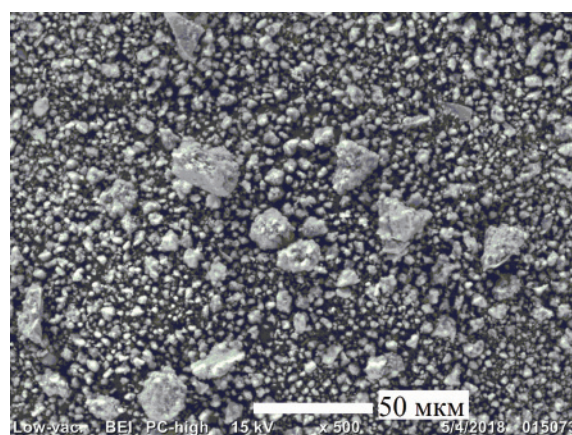


Рис. 2. Сканирующая электронная микрофотография трепела до сорбции ( $\times 500$  – кратное увеличение)

Fig. 2. SEM image of tripoli before sorption at magnification  $\times 500$

Для определения кинетических параметров процесса сорбции проводили процесс сорбции нефтепродуктов и ионов  $Fe^{3+}$  на трепеле в статическом режиме при различном времени контакта. Экспериментальные результаты представлены на рис. 3, 4, из которых видно, что время достижения максимальной сорбционной ёмкости для неорганических ионов составляет 30 мин, а для нефтепродуктов – 2 часа. Все последующие эксперименты по сорбции были проведены при данных временах.

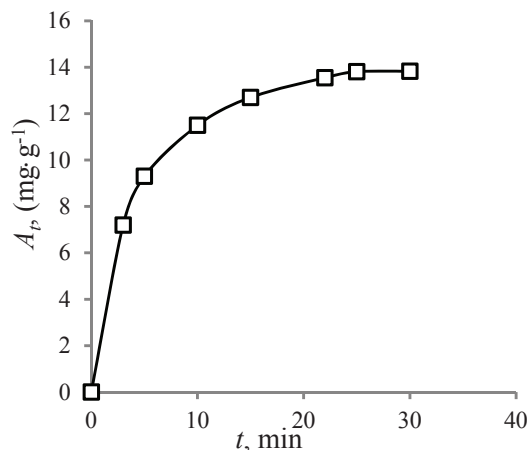


Рис. 3. Кинетическая зависимость процесса сорбции  $Fe^{3+}$  на трепеле

Fig. 3. Kinetic dependence of  $Fe^{3+}$  ions tripoli adsorption

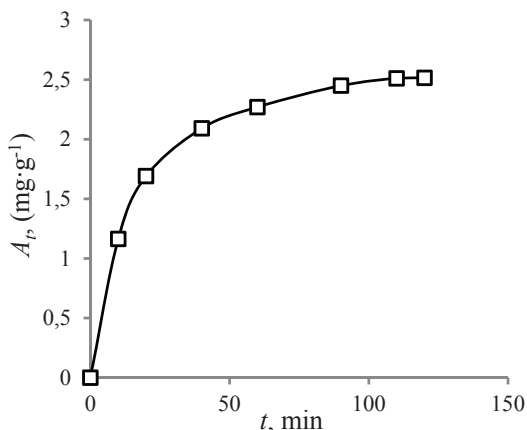


Рис. 4. Кинетическая зависимость процесса сорбции нефтепродуктов на трепеле

Fig. 4. Kinetic dependence of oil product tripoli adsorption

Кинетические зависимости сорбции ионов  $Fe^{3+}$  и нефтепродуктов на трепеле были проанализированы с помощью кинетических моделей псевдо-первого ( $\ln(A_p - A_t)$  от  $t$ ) и псевдо-второго порядка ( $t/A_t$  от  $t$ ) (2), (3). Результаты представлены в табл. 1.

На основании более высокого значения коэффициента корреляции 0,999 данные кинетические зависимости можно отнести к уравнениям псевдо-второго порядка. На основании этого скорость сорбции определяется не только скоростью диффузионных процессов, но и скоростью химического взаимодействия между сорбатом и сорбентом.

Таблица 1. Кинетические параметры моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка

Table 1. Kinetic parameters of pseudo-first-order and pseudo-second-order models

Адсорбат Adsorbate	$A_{e,exp}$ , $mg \cdot g^{-1}$ $A_{e,exp}$ , $mg \cdot g^{-1}$	Модель псевдо-первого порядка Pseudo-first-order model			Модель псевдо-второго порядка Pseudo-second-order model		
		$k_1$ , $min^{-1}$ $k_1$ , $min^{-1}$	$A_{e,calc}$ , $mg \cdot g^{-1}$ $A_{e,calc}$ , $mg \cdot g^{-1}$	$R^2$	$k_2$ , $min^{-1}$ $k_2$ , $min^{-1}$	$A_{e,calc}$ , $mg \cdot g^{-1}$ $A_{e,calc}$ , $mg \cdot g^{-1}$	$R^2$
Ион $Fe^{3+}$ $Fe^{3+}$ ion	13,831	0,525	18,203	0,8899	0,018	15,748	0,9999
Нефтепродукт Oil product	2,515	0,125	3,402	0,862	0,02	2,904	0,999

Сорбция водорастворимых нефтепродуктов на трепеле проводилась в статическом режиме. Полученная изотерма сорбции приведена на рис. 5.

Данная изотерма сорбции нефтепродуктов была обработана в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха (4), (5). Изотерма адсорбции в координатах Фрейндлиха представлена на рис. 6.

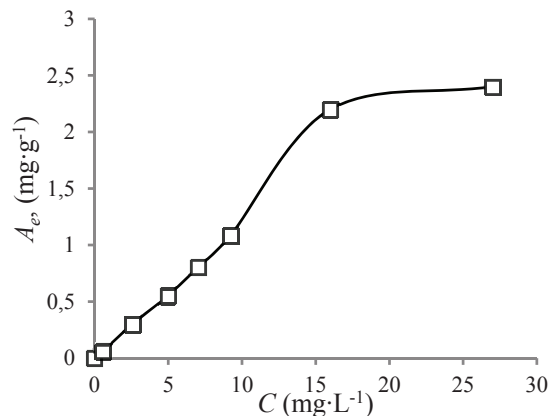


Рис. 5. Изотерма адсорбции нефтепродуктов на трепеле

Fig. 5. Isotherm of oil product tripoli adsorption

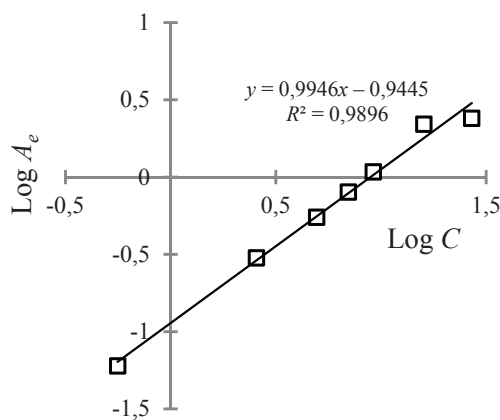


Рис. 6. Изотерма адсорбции в координатах уравнения Фрейндлиха

Fig. 6. Adsorption isotherm in Freundlich equation coordinates



На основании значений коэффициентов корреляции (табл. 2) был сделан вывод о том, что изотерма сорбции хорошо аппроксимируется уравнением Фрейндлиха, это говорит об экспоненциальном распределении нефтепродуктов на поверхности трепела [18].

Сорбция ионов  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  на минеральном сорбенте трепеле также проводилась в статическом режиме. Полученные изотермы сорбции приведены на рис. 7.

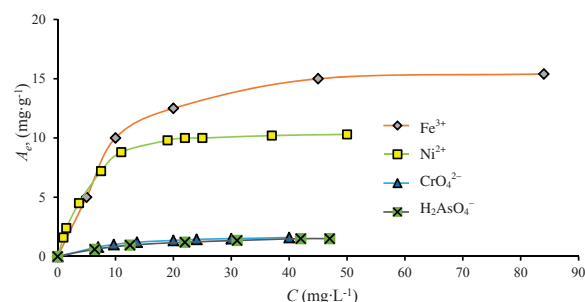


Рис. 7. Изотермы адсорбции ионов  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  на трепеле

Fig. 7. Isotherm of  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions tripoli adsorption

Как видно из рис. 6, трепел лучше поглощает катионы  $Fe^{3+}$ ,  $Ni^{2+}$  из водных растворов, чем анионы  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ . Полученные изотермы сорбции ионов  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  были также обработаны в координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. Рассчитанные параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики адсорбции ионов на трепеле

Table 2. Parameters for ions tripoli adsorption

Адсорбат Adsorbate	Модель Ленгмюра Langmuir model			Модель Фрейндлиха Freundlich model		
	$A_{max}, \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$K, \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	$R^2$	$K_f$	$n$	$R^2$
$Fe^{3+}$	17,27	0,113	0,9949	3,498	2,695	0,824
$Ni^{2+}$	11,614	0,206	0,9949	2,11	2,068	0,9103
$CrO_4^{2-}$	1,998	0,102	0,998	0,517	3,019	0,9483
$H_2AsO_4^-$	1,97	0,07	0,9985	0,222	1,911	0,9113
Нефтепродукт Oil product	3,92	0,0357	0,1959	0,114	1,005	0,9896

На основании значений коэффициентов корреляции был сделан вывод о том, что изотермы сорбции хорошо аппроксимируются уравнением Ленгмюра, это свидетельствует о том, что адсорбция локализована на отдельных активных центрах с образованием мономолекулярного слоя.

Для объяснения механизма сорбции на рис. 8 представлены изотермы сорбции катионного красителя МГ и анионного красителя эозина. Как видно из рисунка, метиленовый голубой сорбируется на трепеле, а эозин нет. Данный факт говорит о том, что активные центры поверхности трепела заряжены отрицательно.

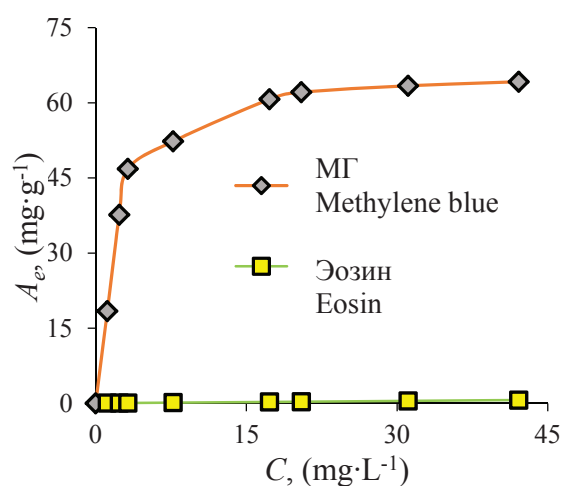


Рис. 8. Изотермы адсорбции метиленового голубого и эозина на трепеле

Fig. 8. Isotherm of methylene blue and eosin tripoli adsorption

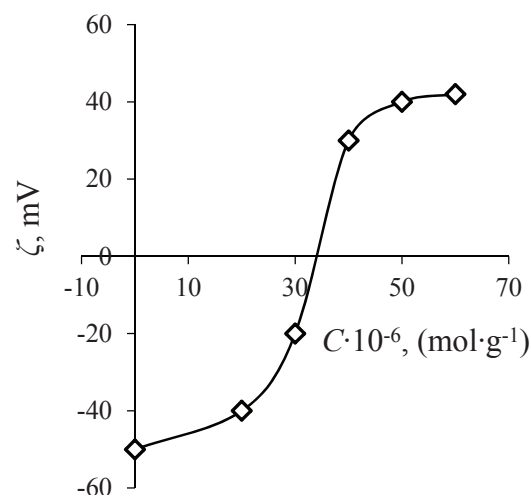


Рис. 9. Зависимость  $\zeta$ -потенциала трепела от количества адсорбированного метиленового голубого

Fig. 9. Dependence of tripoli  $\zeta$ -potential on amount of adsorbed methylene blue

Эксперименты по определению  $\zeta$ -потенциала исходного трепела, а также  $\zeta$ -потенциала трепела с различным количеством адсорбированного МГ (рис. 9) показали, что характер изменения  $\zeta$ -потенциала описывается кривой, проходящей через нулевое значение. При адсорбции МГ происходит не только изменение величины, но и знака  $\zeta$ -потенциала. Это еще раз подтверждает решающую роль зарядовых взаимодействий.

С целью улучшения сорбционных свойств трепела по отношению к анионам  $H_2AsO_4^-$  впервые проведена химическая модификация трепела. Выбор данного аниона обусловлен высокой токсичностью и распространенностью мышьяка в воде, следовательно, проблема удаления мышьяка является приоритетным направлением во всем мире (ПДК по мышьяку  $0,05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) [1, 6, 10, 19–21].

Принимая во внимание очень низкую растворимость арсената железа (ИП ( $FeAsO_4$ ))= $5,8 \cdot 10^{-21}$ ) и

не токсичность ионов железа (III), мы модифицировали поверхность трепела оксигидроксидом железа. На рис. 10 приведена микрофотография ( $\times 500$  – кратное увеличение) образца сорбента трепела, модифицированного оксигидроксидом железа. Сравнение микрофотографий трепела до и после модификации (рис. 2, 10) показывает, что поверхность трепела в результате модификации покрывается оксигидроксидом железа.

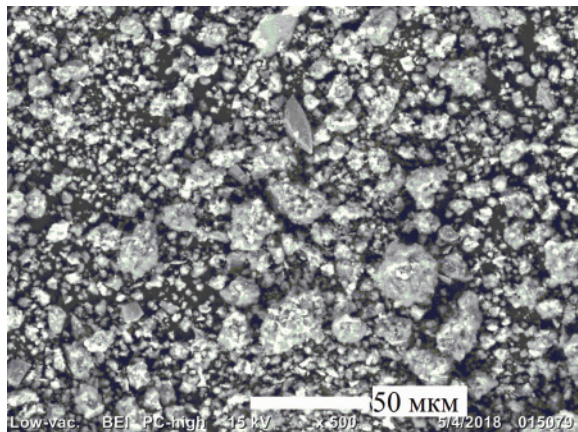


Рис. 10. Сканирующая электронная микрофотография трепела, модифицированного оксигидроксидом железа ( $\times 500$  – кратное увеличение)

Fig. 10. SEM image of tripoli modified by FeO(OH) at magnification  $\times 500$

В табл. 3 приведены данные по определению удельной поверхности и удельного объема пор трепела и его модифицированных форм. Как видно из табл. 3, представленные сорбционные материалы имеют малый объем пор и относительно высокую удельную поверхность. Исходя из этого, можно предположить, что при очистке воды с использованием трепела не будут сказываться внутридиффузионные процессы, что может положительно влиять на скорость достижения сорбционного равновесия.

Таблица 3. Характеристики сорбентов

Table 3. Characterization of adsorbent

Адсорбент Adsorbent	Концентрация иона железа, (%) Iron ion concentration, (%)	Удельная поверхность ( $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ ) Specific surface area, ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	Удельный объем пор ( $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ ) Specific pore volume, ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )
Исходный трепел Initial tripoli	0,38	94,6	0,011
Модифицированный трепел FeO(OH) (образец 1) Tripoli modified by FeO(OH) (sample 1)	0,96	98,8	0,042
Модифицированный трепел FeO(OH) (образец 2) Tripoli modified by FeO(OH) (sample 2)	2,8	114	0,052

Изотермы сорбции анионов мышьяка на модифицированном трепеле представлены на рис. 11, где видно, что модифицированный оксигидроксидом железа трепел сорбирует лучше, чем не модифицированный. Увеличение сорбционной емкости модифицированного оксигидроксидом железа трепела связано с образованием труднорастворимого арсената железа.

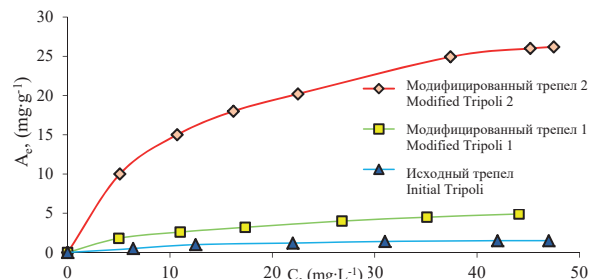


Рис. 11. Изотермы сорбции аниона  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  на чистом и модифицированном трепеле ионами железа

Fig. 11. Isotherms of  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  ion adsorption on initial tripoli and FeO(OH) modified tripoli

Чем больше содержание оксигидроксида железа в трепеле, тем больше его максимальная сорбционная емкость по мышьяку ( $A_{\text{max}} = 33,33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ).

Для оценки устойчивости соединений, образующихся в результате сорбции ионов мышьяка на трепеле, проводились испытания образцов на процесс десорбции мышьяка в дистиллированную воду. Периодический отбор проб в течение месяца показал, что содержание мышьяка не превышает уровня ПДК. Осадки, полученные в результате сорбции мышьяка, относятся к классу труднорастворимых соединений, пригодных для захоронения [19].

Таблица 4. Адсорбционная емкость трепела для различных адсорбатов ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) в сравнении с различными сорбентами

Table 4. Adsorption capacity for  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  ions by tripoli in comparison to other reported adsorbents

Адсорбат Adsorbate	Сорбционная емкость для исходного трепела (мг/г) Adsorption capacity for initial tripoli (mg/g)	Сорбционная емкость для различных сорбентов (мг/г) Adsorption capacity for other reported adsorbents (mg/g)
$\text{Fe}^{3+}$	17,3	Диатомит 1,96/Diatomite 1,96 [12] Трепел 15/Tripoli 15 [9]
$\text{Ni}^{2+}$	11,6	Глауконит 2,3/Glaucconite 2,3 [22] Трепел 11/Tripoli 11 [9]
$\text{CrO}_4^{2-}$	2,0	Иллит 0,55/Illite 0,55 [23] Бентонит 0,5/Bentonite 0,5 [24]
$\text{H}_2\text{AsO}_4^-$	1,97 33,3*	Бентонит 4,33/Bentonite 4,33 [25] Перлит** 4,64/Perlite** 4,64 [26]
Нефтепродукт Oil product	2,4	Трепел 1,5/Tripoli 1,5 [8]

Примечание: \* Модифицированный трепел FeO(OH), \*\* Перлит, модифицированный оксидом железа (III).

Note: \* Tripoli modified by FeO(OH), \*\* Iron (III) oxide modified perlite.

В табл. 4 приведено сравнение адсорбционной емкости трепела, полученной в данной работе, с адсорбционной емкостью различных сорбентов. Как видно, эти величины достаточно сопоставимы, однако прямое сравнение полученных данных с результатами других авторов затруднено, в связи с тем, что не всегда исследования проводятся в одинаковых условиях, а также могут быть посвящены изучению сорбции других ионов на разнообразных сорбентах, в том числе с различной модификацией.

#### Выводы

1. Изучена адсорбция водорастворимых нефтепродуктов и неорганических ионов  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  из их водных растворов на минеральном сорбенте трепеле. Установлено, что максимальная адсорбция происходит в течение 2 часов для нефтепродуктов и 30 минут для неорганических ионов. Полученные кинетические зависимости хорошо аппроксимируются уравнением кинетической модели псевдо-второго порядка.
2. В результате эксперимента была определена сорбционная емкость трепела по нефтепродуктам и ионам  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Полученная изотерма адсорбции для нефтепродуктов хо-

рошо аппроксимируется уравнением Фрейндлиха, что говорит об экспоненциальном распределении нефтепродуктов на поверхности трепела. Полученные изотермы сорбции ионов  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  на трепеле в отличие от нефтепродуктов аппроксимируются уравнением Ленгмюра, это свидетельствует о том, что адсорбция локализована на отдельных адсорбционных центрах с образованием мономолекулярного слоя.

3. Проведенное исследование показало, что трепел является эффективным сорбентом по отношению к катионам  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Это определяется тем, что заряд поверхности трепела отрицательный и это подтверждено перезарядкой поверхности при сорбции метиленового голубого на трепеле.
4. Показано, что использование трепела, модифицированного оксигидроксидом железа, позволяет эффективно удалять ионы мышьяка в широком диапазоне концентраций.
5. Проведенное исследование показало, что минеральный сорбент трепел может использоваться в практике водоочистки в качестве экономически эффективного, безопасного и надежного сорбента при удалении нефтепродуктов и катионов тяжелых металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dinesh M., Charles U., Pittman Jr. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents. A critical review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – V. 142. – P. 1–53.
2. Adsorptive removal of copper (II) from aqueous solutions using low cost Moroccan adsorbent. P. II: Kinetic and equilibrium studies / K. Nebaghha, K. Ziat, L. Rghioui, M. Khayet, A. Naji, M. Saidi // *Journal of materials and environmental science*. – 2015. – V. 6. – P. 2694–2702.
3. Shah P., Raval N., Shah N. Adsorption of copper from an aqueous solution by chemically modified cassava starch // *Journal of materials and environmental science*. – 2015. – V. 6. – P. 2573–2582.
4. Mathialagan T., Viraraghavan T. Adsorption of cadmium from aqueous solutions by vermiculite // *Separation Science and Technology*. – 2015. – V. 38. – P. 57–76.
5. Removal of  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  ions from aqueous solution via Tripoli: simple component with single phase model / T. El-Hasan, Z.A. Al-Anber, M. Al-Anber, M.I. Batarseh, F. Al-Nasr // *Current world environment*. – 2008. – V. 3 (1). – P. 1–14.
6. Cellular concrete-supported cost-effective adsorbents for aqueous arsenic and heavy metals abatement / D. Martemianov, B.V. Xie, T. Yurmazova, M. Khaskelberg, F. Wang, C.H. Wei, S. Preis // *Journal of environmental chemical engineering*. – 2017. – V. 5. – P. 3930–3941.
7. Исследование сорбционных и ионообменных свойств трепела и его химически модифицированного продукта / В.С. Анисимов, К.В. Петров, А.Н. Ратников, П.Н. Мартынов, Е.А. Подзорова, А.Ю. Чабань // *Вода: химия и экология*. – 2009. – Т. 16. – № 10. – С. 11–16.
8. Очистка сточных вод от нефтепродуктов с помощью природных сорбентов / Е.А. Баннова, Е.П. Залозная, Н.К. Китаева, С.М. Мерков, М.В. Мучкина, А.Ю. Чабань, А.В. Алексеев // *Вода: химия и экология*. – 2012. – Т. 53. – № 11. – С. 73–78.
9. Очистка водных сред с помощью трепела – природного сорбента зикеевского месторождения Калужской области / А.С. Шилина, В.К. Милицук, П.Н. Мартынов, Е.А. Подзорова, А.Ю. Чабань // *Вода: химия и экология*. – 2009. – Т. 17. – № 11. – С. 25–29.
10. Савельев Г.Г., Юрмазова Т.А., Шахова Н.Б. Сорбция ионов  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{As}^{5+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  из водных растворов на поверхности наноразмерного волокнистого оксигидроксида алюминия // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 36–39.
11. Pulsed electric discharged in active metallic grains for water purification processes / N.B. Shakhova, T.A. Yurmazova, Tran Tuan Hoang, Nguyen Tuan Anh // *Procedia Chemistry*. – 2015. – V. 15. – P. 292–300.
12. Калюкова Е.Н., Иванская Н.Н. Исследование адсорбционных свойств некоторых природных сорбентов по отношению к катионам железа (III) // *Вестник Башкирского университета*. – 2011. – Т. 16. – № 1. – С. 25–28.
13. Костин А.В., Мостальгина Л.В., Бухтояров О.И. Изучение механизма сорбции ионов меди и свинца на бентонитовой гле // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2012. – Т. 12. – Вып. 6. – С. 945–957.
14. Дацко Т.Я., Зеленцов В.И., Дворникова Е.Е. Физико-химические и адсорбционно-структурные свойства диатомита, модифицированного соединениями алюминия // *Электронная обработка материалов*. – 2011. – Т. 47. – № 6. – С. 59–68.
15. Влияние ультразвуковой обработки на свойства трепела / Ю.Н. Пятко, Р.Т. Ахметова, А.И. Хапринов, В.Х. Фахрутдинова, А.Ю. Ахметова, А.М. Губайдуллина // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 12–2. – С. 320–324.
16. Шилина А.С., Милицук В.К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2010. – Т. 10. – Вып. 2. – С. 237–245.
17. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. – М.: Химия, 1974. – 335 с.
18. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы). – М.: Химия, 1982. – 400 с.

19. Пушкарева Г.И., Коваленко К.А. Очистка природных и техногенных вод от мышьяка // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 9. – С. 294–298.
20. Perspectives of low cost arsenic remediation of drinking water in Pakistan and other countries / A.H. Malik, Z. Khan, Q. Mahmood, S. Nasreen, Z.A. Bhatti // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – V. 168. – P. 1–12.
21. Human exposure to arsenic from drinking water in Vietnam / Teturo Agusa, Pham Thi Kim Trang, Vi Mai Lan, Duong Hong Anh, Shinsuke Tanabe, Pham Hung Viet, Michael Berg // Science of The Total Environment. – 2014. – V. 488. – P. 562–569.
22. Мартемьянов Д.В., Галанов А.И., Юрмазова Т.А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов  $As^{5+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Ni^{2+}$  из водных сред // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8. – С. 666–670.
23. Synthesis of a novel illite@carbon nanocomposite adsorbent for removal of Cr (VI) from wastewater / Gaofeng Wang, Shan Wang, Wen Sun, Zhiming Sun, Shuilin Zheng // Journal of Environmental Sciences. – 2017. – V. 57. – P. 62–71.
24. Study on the adsorption of Cr (VI) onto landfill liners containing granular activated carbon or bentonite activated by acid / Lu Haijun, Luan Mao-tian, Zhang Jin-li, Yu Yong-xian // Journal of China University of Mining and Technology. – 2008. – V. 18. – P. 125–130.
25. Trilochan Mishra, Dipak Kumar Mahato. A comparative study on enhanced arsenic (V) and arsenic (III) removal by iron oxide and manganese oxide pillared clays from ground water // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2016. – V. 4. – P. 1224–1230.
26. Perlite incorporating  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  and  $\alpha\text{-MnO}_2$  nanomaterials: preparation and evaluation of a new adsorbent for As (V) removal / D.N. Thanh, M. Singh, P. Ulbrich, N. Strnadova, F. Stepanek // Sep. Purif. Technol. – 2011. – V. 82. – P. 93–101.

Поступила 15.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Юрмазова Т.А.**, кандидат химических наук, доцент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Шахова Н.Б.**, кандидат химических наук, доцент отделения русского языка Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Чан Туан Хоанг**, студент Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Планкина М.В.**, преподаватель Томского промышленно-гуманитарного колледжа.



UDC 665.66.081.2

## ADSORPTION OF PETROLEUM SUBSTANCES AND INORGANIC IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING MINERAL SORBENT

Tatyana A. Yurmazova<sup>1</sup>,  
yur-tatyana@yandex.ru

Nina B. Shakhova<sup>1</sup>,  
nina.b.shakhova@gmail.com

Hoang Tran Tuan<sup>1</sup>,  
cungbinh9327@gmail.com

Marina V. Plankina<sup>2</sup>,  
kirpl57@mail.ru

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

<sup>2</sup> Tomsk Industrial and Humanitarian College,  
4, Michurin street, Tomsk, 634049, Russia.

**Relevance.** Nowadays among different water purification techniques, sorption method is generally preferred. Intension to improve the efficiency of sorption in water purification makes the problem of developing and investigating the sorption mechanism and practical application of low-cost and effective adsorbents the focus of attention for many studies.

**The main aim** is to study adsorption of water soluble petroleum substances and  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions from their aqueous solutions by mineral sorbent tripoli, and investigate the effect of various parameters affecting sorption behaviour for better understanding adsorption process and ways of possible usage of the mineral sorbent (tripoli) for wastewater purification.

**Object.** Low-cost locally available tripoli (Zikeevsk deposit, Russia) was selected as a natural mineral sorbent.

**Methods:** X-ray phase analysis, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, method of thermal desorption of nitrogen, Indicator method

**Results.** Tripoli was characterized by different physico-chemical methods such as X-ray phase analysis, atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma, method of thermal desorption of nitrogen. The authors have determined contact time, specific surface area, specific pore volume of tripoli and adsorption kinetic data. The adsorption isotherms of petroleum substances and  $H_2AsO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions from their aqueous solutions using tripoli were studied. The adsorption was explained in terms of Langmuir and Freundlich isotherms. Indicator method was applied to detect the fact that the tripoli active sites are negatively charged. It was determined that modification of mineral sorbent (tripoli) leads to increase in  $H_2AsO_4^-$  adsorbing capacity of tripoli. This work suggests that the mineral sorbent tripoli can be effectively used in water purification from petroleum substances and  $Ni^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  ions as low-cost, effective, environmentally friendly adsorbent.

### Key words:

Adsorption, water soluble petroleum substances, inorganic ions, mineral sorbent tripoli, surface charge.

### REFERENCES

- Dinesh M., Charles U., Pittman Jr. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents. A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 142, pp. 1–53.
- Nebaghha K., Ziat K., Rghioui L., Khayet M., Naji A., Saidi M. Adsorptive removal of copper (II) from aqueous solutions using low cost Moroccan adsorbent. P. II: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of materials and environmental science*, 2015, vol. 6, pp. 2694–2702.
- Shah P., Raval N., Shah N. Adsorption of copper from an aqueous Solution by chemically modified cassava starch. *Journal of materials and environmental science*, 2015, vol. 6, pp. 2573–2582.
- Mathialagan T., Viraraghavan T. Adsorption of cadmium from aqueous solutions by vermiculite. *Separation Science and Technology*, 2003, vol. 38, pp. 57–76.
- El-Hasan T., Al-Anber Z.A., Al-anber M., Batarseh M.I., Al-nasr F. Removal of  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Ni^{2+}$  ions from aqueous solution via Tripoli: Simple component with single phase model. *Current world environment*, 2008, vol. 3, pp. 1–14.
- Martemianov D., Xie B.B., Yurmazova T., Khaskelberg M., Wang F., Wei C.H., Preis S. Cellular concrete-supported cost-effective adsorbents for aqueous arsenic and heavy metals abatement. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, pp. 3930–3941.
- Anisimov V., Petrov K., Ratnikov A., Martynov P., Podzorova E., Chaban A. Investigation of sorption and ion-exchange properties of terra silicea and its chemically modified product. *Water: chemistry and ecology*, 2009, vol. 10, pp. 11–16. In Rus.
- Bannova E., Zaloznaya E., Kitaeva N., Merkov S., Muchkina M., Chaban A., Alekseev A. Treating waste water polluted by oil products using natural sorbents. *Water: chemistry and ecology*, 2012, vol. 11, pp. 73–78. In Rus.
- Shilina A.S., Milinchuk V.K., Podzorova E.A., Martinov P.N., Chaban A.Yu. Water purification by tripoli – natural adsorbent of Zikeevsky occurrence. *Water: chemistry and ecology*, 2009, vol. 11, pp. 25–29. In Rus.
- Saveliev G., Yurmasova T., Shakhova N.  $As^{3+}$ ,  $As^{5+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Ni^{2+}$  ion sorption from water solutions on the surface of nanosized fibrous

- aluminium oxyhydroxide. *Bulletin of Higher Schools. Chem. and chem. technology*, 2011, vol. 54, pp. 36–39. In Rus.
11. Shakhova N.B., Yurmazova T.A., Tran Tuan Hoang, Nguyen Tuan Anh. Pulsed electric discharged in active metallic grains for water purification processes. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 15, pp. 292–300.
  12. Kalyukova E.N., Ivanskaya N.N. Adsorption properties of some natural sorbents in relation to iron (III) cations. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 25–28. In Rus.
  13. Kostin A.V., Mostalygina L.V., Bukhtoyarov O.I. The study of the sorption mechanism of ions copper and lead by bentonite clay. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssesy*, 2012, vol. 12, pp. 945–957. In Rus.
  14. Datsko T.Ya., Zelentsov V.I., Physico-chemical and adsorption-structural properties of diatomite modified by aluminum compounds. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 59–68. In Rus.
  15. Pyatko Yu., Akhmetova R., Khatsrinov A., Fakhrutdinova V., Akhmetova A., Gubaydullina A. Effect of ultrasonic treatment on the properties of tripoli. *Fundamental research*, 2015, vol. 12, pp. 320–324. In Rus.
  16. Shilina A., Milinchuk V. Sorbtion clearing of natural and industrial waters from cations of heavy metals and radionuclides with new type of high-temperature aluminosilicate adsorbent. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssesy*, 2010, vol. 10, pp. 237–245. In Rus.
  17. Lurie Yu.Yu., Rybnikova A.I. *Khimichesky analiz proizvodstvennykh stochnykh vod* [Chemical analysis of industrial sewage]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 335 p.
  18. Frolov Yu.G. *Kurs kolloidnoy khimii (poverkhnostnye yavleniya i disperstnyye sistemy)* [Colloid Chemistry Surface Phenomena and Disperse Systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 400 p.
  19. Pushkareva G., Kovalenko K. Natural and waste water purification from arsenic. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2012, vol. 9, pp. 294–298. In Rus.
  20. Malik A.H., Khan Z., Mahmood Q., Nasreen S., Bhatti Z.A. Perspectives of low cost arsenic remediation of drinking water in Pakistan and other countries. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, pp. 1–12.
  21. Tetsuro Agusa, Pham Thi Kim Trang, Vi Mai Lan, Duong Hong Anh, Shinsuke Tanabe, Pham Hung Viet, Michael Berg Human exposure to arsenic from drinking water in Vietnam. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 488, pp. 562–569.
  22. Martemiyarov D.V., Galanov A.I., Yurmazova T.A. Determination of sorption characteristics of different minerals in extracting compounds of heavy metals from aqueous media. *Fundamental-research*, 2013, no. 8, pp. 666–670. In Rus.
  23. Gaofeng Wang, Shan Wang, Wen Sun, Zhiming Sun, Shuilin Zheng. Synthesis of a novel illite@carbon nanocomposite adsorbent for removal of Cr (VI) from wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, vol. 57, pp. 62–71.
  24. Lu Hai-jun, Luan Mao-tian, Zhang Jin-li, Yu Yong-xian. Study on the adsorption of Cr (VI) onto landfill liners containing granular activated carbon or bentonite activated by acid. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, vol. 18, pp. 125–130.
  25. Trilochan Mishra, Dipak Kumar Mahato. A comparative study on enhanced arsenic (V) and arsenic (III) removal by iron oxide and manganese oxide pillared clays from ground water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, vol. 4, pp. 1224–1230.
  26. Thanh D.N., Singh M., Ulbrich P., Strnadova N., Stepanek F. Perlite incorporating  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  and  $\alpha\text{-MnO}_2$  nanomaterials: preparation and evaluation of a new adsorbent for As (V) removal. *Sep. Purif. Technol.*, 2011, vol. 82, pp. 93–101.

Received: 15 May 2018.

#### Information about the authors

**Tatyana A. Yurmazova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Nina B. Shakhova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Hoang Tran Tuan**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Marina V. Plankina**, teacher, Tomsk Industrial and Humanitarian College.

УДК 553.411:549.324.31

## ПИРИТЫ ЗАПАДНОГО ФЛАНГА СУХОЛОЖСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (ЛЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)

Пшеничкин Анатолий Яковлевич<sup>1</sup>,  
paya@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич<sup>1</sup>,  
GavrilovRY@tpu.ru

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

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью внедрения в практику геологоразведочных работ новых комплексных методов прогнозирования золоторудных объектов.

**Цель работы:** получение информации о кристалломорфологии, термо-эдс, химическом составе и элементах-примесях пиритов из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

**Методы исследования:** кристалломорфология, термо-эдс, рентгеноспектральный анализ, статистическая обработка геохимических данных по образцам кристаллов пирита, отобранных из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

**Результаты.** Установлено, что изученные кристаллы пирита чаще всего встречаются в виде кубов. Нередко на кристаллах встречается слабо развитая грань {210}. Пириты характеризуются исключительно дырочным типом проводимости с разбросом значений термо-эдс от 27 до 83 мВ и близкими средними значениями в пределах 58,4...67,0 мВ. Химический состав кристаллов пирита отличается от их стехиометрической формулы, что свидетельствует о вхождении в структуру минерала изоморфных и механических примесей. Рентгеноспектральным анализом установлены элементы, постоянно присутствующие в пирите: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. Наличие элементов-примесей в пиритах, характерных для руд месторождения Сухой Лог, и, прежде всего, As свидетельствует о синрудном образовании пирита в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования и его, возможно, изоморфном вхождении в структуру минерала. В качестве механических примесей в пирите установлены: пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, арсениопирит, торианит. На основании изучения кристалломорфологии, термо-эдс, химического состава пиритов и распределения в них элементов-примесей сделан вывод о верхнерудном уровне эрозионного среза рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

### Ключевые слова:

Золотое оруденение, пирит, кристалломорфология, термо-эдс, химический состав, элементы-примеси.

### Введение

Комплекс методов поисков и прогнозирования рудных объектов включает как массово применяемые: литогеохимия, магнитометрия, электрометрия и др., так и достаточно редко используемые: биогеохимия, атмогеохимия и др., методы. Одним из методов, используемых незаслуженно редко, является топоминералогический анализ, позволяющий выявлять закономерности формирования и распределения минералов в различных геологических системах [1–3].

Наиболее распространенным минералом на золоторудных объектах и, как следствие, одним из самых изученных является пирит. Анализ строения пирита, его состава и физических свойств позволяет получать дополнительную информацию об изучаемых объектах, что, в свою очередь, способствует более успешному прогнозированию оруденения на потенциально рудоносных площадях.

Результаты топоминералогических исследований пиритов месторождений различных видов полезных ископаемых опубликованы в [1–15].

Многолетние исследования пиритов золоторудных месторождений различного генезиса сотрудниками Томского политехнического университета [16–20] позволили установить ряд закономерностей.

Кристалломорфология пирита закономерно изменяется в разрезе рудных тел и месторождений. Так, пириты из верхних частей рудных тел и месторождений имеют преимущественно кубический габитус кристаллов, где грань {210} в комбинации кристалла или отсутствует, или слабо и неравномерно развита. В средних частях рудных тел и особенно в «рудных столбах», где содержание золота максимальное, грань {210} в кристаллах становится габитусной и здесь преобладают пириты пентагондодекаэдрического габитуса. А в прикорневых частях рудных тел кристаллы пирита имеют кубический и куб-пентагондодекаэдрический габитусы [3, 16].

Пирит относится к минералам с примесным типом проводимости, а стехиометрически чистый пирит обладает дырочным типом проводимости. Одно- и двухвалентные элементы (Ag, Sb, Hg, Pb, Zn, Cu), изоморфно входящие в структуру минерала, уменьшают или увеличивают значение дырочной составляющей термо-эдс (ТЭДС), а трёх- и четырёхвалентные элементы (Ni, Co, As, Ti, W), изоморфно замещающие железо или серу, изменяют дырочную проводимость пирита на электронную. Кроме того, установлено [16, 17, 19, 20], что на величину и знак ТЭДС пирита влияют и другие факторы: разность температур между холодным и го-

рячим электродами (с увеличением разности температур между электродами увеличивается как дырочная, так и электронная проводимость), естественное и искусственное радиоактивное облучение минерала, кристаллографическое направление кристалла, в котором производится измерение, температура и глубина формирования месторождения и, соответственно, изоморфная ёмкость кристаллической решетки пирита.

Проведенные исследования ТЭДС пиритов из руд и околорудных метасоматитов золоторудных месторождений разного генезиса показали [16, 20], что ТЭДС является чувствительным типоморфным признаком и закономерно меняется в пространстве и во времени от пиритов с электронной проводимостью из ранних высокотемпературных минеральных ассоциаций и прикорневых частей рудных тел к пиритам со смешанным типом проводимости из среднетемпературных минеральных ассоциаций и средних частей рудных тел и к пиритам с дырочным типом проводимости из заключительных этапов формирования месторождения и верхних частей рудных тел. По ТЭДС пиритов можно судить об условиях формирования месторождений, уровне эрозионного среза рудных тел и, следовательно, их перспективности на глубину и фланги.

Для золоторудных месторождений типоморфным признаком является набор повышенных концентраций специфичного комплекса элементов-примесей как в пиритах руд, так и в околорудных метасоматитах [19, 20]. Концентрации элементов-примесей закономерно изменяются с глубиной рудных тел. Так, пириты верхних частей рудных тел и надрудных ореолов обогащены Ag, Hg, Sb, Ba; пириты средних частей рудных тел и рудных столбов максимально обогащены специфичным комплексом примесных элементов, характерных для золоторудных месторождений, – Ag, Cu, Pb, Zn, As и особенно Au; в прикорневых частях рудных тел в пиритах накапливаются Ni, Co, Ti, нередко As. Пириты околорудных метасоматитов золоторудных месторождений содержат тот же набор элементов-примесей, что и пириты руд, но в более низких концентрациях. По падению рудных тел концентрация элементов в пиритах изменяется часто волнообразно с амплитудой волны 240...280 м в соответствии со структурно-минералогической зональностью месторождения.

Пириты Сухоложского рудного поля в различные годы изучались В.А. Бурыком, R.R. Large с соавторами, А.М. Гавриловым и С.Г. Кряжевым и другими исследователями.

В одной из последних работ, посвященных особенностям руд месторождения Сухой Лог [21], обобщены сведения об изученности пиритов, полученные предшественниками, а также приведены собственные результаты исследования (кристалломорфология, химический состав, ТЭДС, изотопный состав серы).

Данное исследование направлено на получение комплексной характеристики крупнокристалли-

ческих пиритов западного фланга Сухоложского золоторудного поля, включающее изучение кристалломорфологии, ТЭДС, химического состава пиритов, содержания в них элементов-примесей и их распределения в кристаллах.

### Геологическое строение рудного поля

Строение и вещественный состав пород и руд Сухоложского рудного поля подробно описаны во многих публикациях [22–32 др.]. Ниже приводится краткая характеристика его западной части (рис. 1).

Рудное поле расположено в пределах Бодайбинского синклиория Кропоткинского рудного узла. Его западный фланг вскрыт поверхностными горными выработками и скважинами колонкового бурения.

Главной структурой, контролирующей размещение оруденения, является Сухоложская антиклиналь. Она представляет собой линейную, сильно сжатую асимметричную складку, вытянутую в субширотном направлении и запрокинутую на юг. Северное и южное крылья антиклинали падают под углами 15...20° и 30...45° соответственно.

Рудные тела месторождения залегают в отложениях верхней подсвиты хомолхинской свиты и нижней подсвиты имняхской свиты, сложенных песчаниками, алевролитами и филлитами различной зернистости. Породы свит подверглись региональному метаморфизму хлорит-серицитово-субфации зеленосланцевой фации.

Проявление гидротермально-метасоматических процессов выражено в образовании карбонатной, сульфидной и кварцево-жильной минерализаций. Оруденение приурочено к зонам разрывно-складчатых дислокаций, заполненных прожилково-вкрапленной кварцево-сульфидной и кварцево-жильной минерализациями.

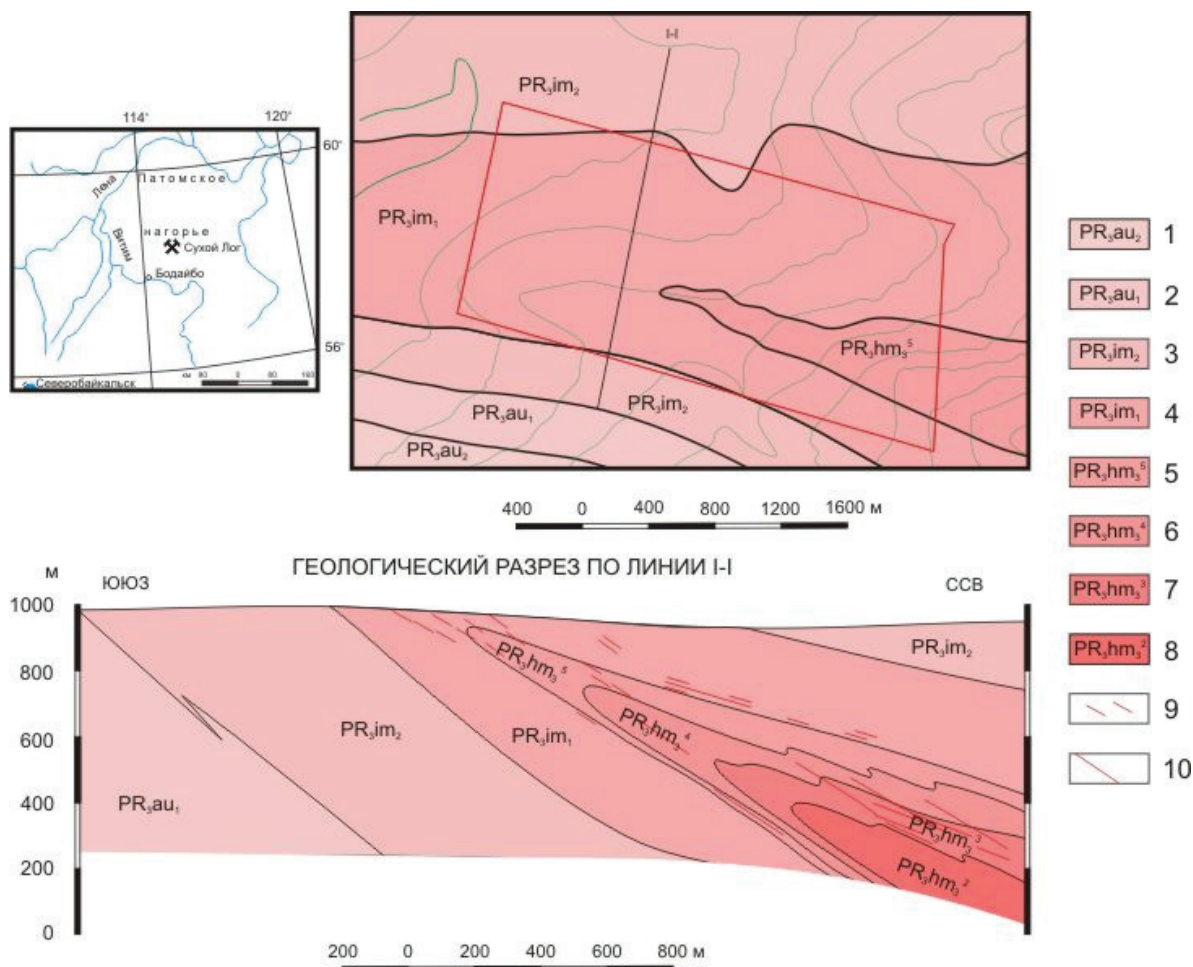
### Методика исследования

Кристалломорфология пирита изучена по образцам, отобранным из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

Определение термо-эдс пиритов проводилось в лаборатории геологии золота Томского политехнического университета на установке, совмещенной с бинокулярным микроскопом МБС-10, специально приспособленной для измерения термо-эдс мелких фракций минералов-полупроводников размером 0,2...1,0 мм. Холодный электрод представлен массивной латунной пластиной размером 20×10×0,5 см (для быстрого его охлаждения), горячий латунный электрод – игловидной формы. Электроды соединены с измерительным цифровым миллиамперметром М-800 F, автоматически показывающим электронный (–n) или дырочный (+p) тип проводимости минерала.

Измерение проводилось при постоянной разности температур между холодным и горячим электродами в 150 °С. Калибровка электрода (установление разности температур между холодным и го-





**Рис. 1.** Схема геологического строения западного фланга Сухоложского рудного поля по [33] с дополнениями авторов. Условные обозначения: аунакитская свита (1, 2): 1 – средняя подсвита, прослои кварцитовидных песчаников; 2 – нижняя подсвита: переслаивание сланцев углеродистых, песчаников кварцевых, известковистых и известняков; имнякская свита (3, 4): 3 – верхняя подсвита: известняки белые, кремовые с зеленоватым оттенком, слои сланцев известковистых; 4 – нижняя подсвита: ритмичное переслаивание сланцев, песчаников известковистых, слои известняков; хомолхинская свита (5–8): 5 – пятый горизонт: сланцы филлитовидные, углеродистые прослои алевролитов и песчаников кварцево-слюдистых; 6 – четвертый горизонт: алевролиты кварцево-слюдистые; 7 – третий горизонт: ритмичное переслаивание сланцев углеродистых, алевролитов и песчаников кварцево-слюдистых; 8 – второй горизонт: сланцы высокоуглеродистые; 9 – рудовмещающие мелкие разрывные нарушения; 10 – контур лицензионной площади

**Fig. 1.** Scheme of geological structure of the western flank of the Sukholozhsky ore field by [33] with the additions of the authors. Legend: aunakitskaya suite (1, 2): 1 is the medium subsuite, intercalations of quartzite sandstones; 2 is the lower subsuite: interbedding of shales of carbonaceous, quartz sandstone, calcareous and limestone; imnyakhskaya suite (3, 4): 3 is the top subsuite: limestones white, cream with a greenish tinge, layers of shaly calcareous; 4 is the lower subsuite: rhythmic interbedding of shales, calcareous sandstones, limestone layers; khomolkhinskaya suite (5–8): 5 is the fifth horizon: phyllite-like shales, carbon interlayers of siltstones and quartz-mica sandstones; 6 is the fourth horizon: siltstone quartz-mica; 7 is the third horizon: rhythmic interbedding of shales of carbonaceous, siltstone and sandstone quartz-micaceous; 8 is the second horizon: high-carbon schists; 9 is the ore-bearing small breaking disruptions; 10 is the contour of the license area

рячим электродами и типа проводимости) осуществлялась с помощью эталонного образца – галенита, который имеет только электронный тип проводимости. Через каждые 10–15 замеров проводились контрольные замеры эталонного галенита. Время одного замера ТЭДС минерала составляло 15...20 с. В каждой пробе производилось 30–50 замеров ТЭДС зерен или кристалликов пирита.

Рентгеноспектральный анализ минерала выполнялся на энергодисперсионном рентгенофлуо-

ресцентном микроскопе (ЭДРФ, модель HORIBA XGT-7200). Данный прибор позволяет выполнять количественный химический анализ широкого спектра элементов от Na ( $Z=11$ ) до U ( $Z=92$ ). Площадь волновода (сканирующего луча) составляла 10 мкм. Измерения выполнялись при мощности излучения 50 кВ, силе электрического тока 1 мА, время определения содержания химических элементов в каждой точке составляло 50 с.

Для изучения химического состава пиритов (рис. 2) и распределения в них элементов-приме-

сей из трех кристаллов были изготовлены полированные шлифы. Анализируемая поверхность кристалла была представлена плоскостью параллельной плоскости грани куба. Образцы полировались пастами на основе карбида кремния, после чего тщательно протирались спиртом. Таким образом, заражение образцов (полированных шлифов) элементами, содержащимися в абразивных пастах, было сведено к минимуму. По всей полированной площади каждого кристалла производились измерения содержаний химических элементов в точках, распределенных по равномерной сетке, состоящей из 225 точек (15×15) для первого кристалла (рис. 2, фото справа, образец 3-1), и из 49 точек (7×7) для второго и третьего кристаллов соответственно (образцы 3-2 и 3-3). Часть точек находилась за пределами изучаемого объекта и, соответственно, не учитывалась при построении карт распределения содержаний химических элементов и расчете статистических параметров.

На основании полученных аналитических данных в программе Surfer строились схемы распределения содержаний основных элементов и элементов-примесей пиритов.

Проведен анализ нескольких десятков проб пирита. Изучены кристалломорфология, ТЭДС, химический состав пиритов и распределение в кристаллах элементов-примесей.

#### Результаты исследования

Пириты западного фланга Сухоложского рудного поля встречаются в виде кубов {100} или кубов со слабо развитыми гранями пентагондодекаэдра – {100}+{210}, размером от 1,0 до 4,0 см. Редкие кристаллы имеют правильные формы. Часто они имеют уплощенную форму или слабо псевдоромбоэдричны. Грани {100} покрыты сложным узором слойков роста паркетного типа. Грани {210} слабо развиты и также покрыты слойками роста. Слойки роста на гранях кристаллов очень тонкие и

не имеют закономерных очертаний относительно ребер кристаллов. Грани кристаллов часто несут незакономерные отпечатки вмещающих пород (аргиллитов, филлитов) и кварца. Внутреннее строение кристаллов не всегда плотное за счёт захвата вмещающих пород, излом слабо раковистый.

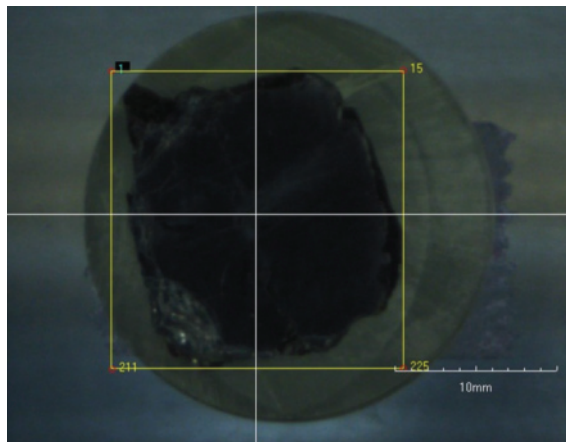
Проведенное исследование ТЭДС пиритов показало, что пириты имеют только дырочный тип проводимости с разбросом значений ТЭДС от 27 до 83 мВ и близкими средними значениями в пределах 58,4...67,0 мВ (табл. 1). Значения ТЭДС характеризуются равномерным распределением в каждом изученном кристалле ( $V=12,2...17,3\%$ ).

**Таблица 1.** Статистические параметры распределения ТЭДС пиритов западного фланга Сухоложского рудного поля

**Table 1.** Statistical parameters of distribution of the pyroelectric pyrites of the western flank of the Sukholozhsky ore field

№ образца Sample no.	Количество замеров Number of measurements	ТЭДС, мВ Thermal EMF, mV			Стандартное отклонение Standard deviation (S)	Коэффициент вариации Coefficient of variation (V), %
		min	max	$\bar{x}$		
3-4	47	33	80	59,6	9,7	16,3
3-5	38	40	78	66,9	8,7	12,2
3-6	42	27	83	67,0	12,5	18,7
3-7	50	35	77	58,4	11,2	17,3
3-8	39	31	75	62,5	10,1	15,3

В трех полированных шлифах кристаллов пирита (образцы 3-1, 3-2, 3-3) проведено определение содержаний химических элементов и геохимическое картирование их поверхностей. Средний химический состав кристаллов пирита (табл. 2) несколько отличается от стехиометрической формулы пирита: S – 53,45 %, Fe – 46,54 %. Это, прежде всего, связано с наличием свободных катионных или анионных связей в пирите и изоморфным



**Рис. 2.** Фотографии: слева – кристалл пирита в филлите; справа – полированный шлиф кристалла пирита (образец 3-1). Числа в углах квадрата (фото справа) – номера точек измерения содержания химических элементов

**Fig. 2.** Photos: on the left – pyrite crystal in phyllite; on the right – a polished section of a pyrite crystal (sample 3-1). Numbers in the corners of the square (photo on the right) – the number of measurement points for the content of chemical elements



вхождением As и других элементов в матрицу кристаллов. В качестве элементов-примесей во всех кристаллах установлены: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. Средние содержания элементов в образцах составляют десятки процентов для минералообразующих элементов и до десятых долей процентов – для микроэлементов. Наибольшими изменениями характеризуются содержания Cu – от 0,04 до 0,21 % и Pb – от 0,06 до 0,18 %. Также в образце 3-1 установлены единичные содержания Ti, достигающие 0,87 %. Содержание золота в трех кристаллах пирита по результатам атомно-абсорбционного анализа (аналитик А.Н. Кряжов) составило, г/т: 3-4 – 0,06; 3-5 – 0,099; 3-6 – 0,152.

**Таблица 2.** Средние содержания химических элементов в пиритах по результатам рентгеноспектрального анализа, %

**Table 2.** Average content of chemical elements in pyrites based on X-ray spectral analysis, %

№ образца Sample no.	Кол-во замеров Number of measurements	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
3-1	128	51,77	46,72	0,04	0,13	0,21	0,05	0,25	0,08
3-2	25	52,89	46,25	0,03	0,06	0,04	0,04	0,57	0,06
3-3	21	52,42	46,80	0,07	0,06	0,18	0,05	0,31	0,18

В полированных шлифах кристаллов пирита изучены схемы распределения элементов-примесей.

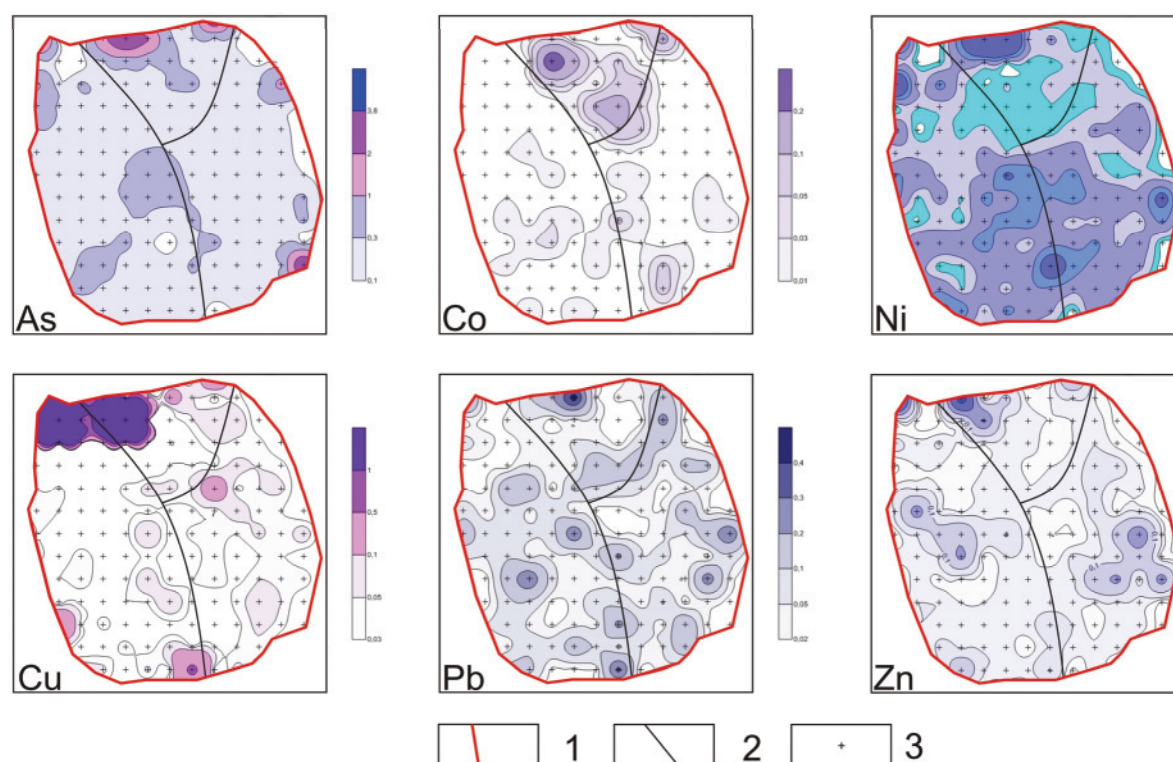
Содержания минералообразующих элементов – S и Fe – в пирите распределены равномерно по всей площади кристалла. Равномерное распределение As в плоскости кристаллов может свидетельствовать о формировании кристаллов в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования. Аномально высокие концентрации элементов-примесей (Ni, Cu, Zn, Pb, As и др.) в отдельных точках опробования плоскостей кристаллов, очевидно, обусловлены присутствием механических примесей пирротина, халькопирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Также в качестве механической примеси в кристаллах пирита установлен силикат тория – торит ( $\text{ThSiO}_4$ ).

### Обсуждение

Изученные кристаллы пирита имеют только кубический габитус, что характерно для пиритов верхних частей рудных тел.

Наличие дырочного типа проводимости пирита и повышенное содержание в них Cu, Pb, Zn, As также свидетельствует о верхнерудном уровне эрозионного среза западного фланга Сухоложского рудного поля [16, 17, 20].

Таким образом, анализ кристалломорфологии и ТЭДС пирита позволяет сделать вывод о неболь-



**Рис. 3.** Схемы распределения концентраций элементов-примесей в кристалле пирита (3-1) по результатам рентгеноспектрального анализа, %: 1 – контур кристалла; 2 – трещины в кристалле; 3 – точки определения содержания химических элементов

**Fig. 3.** Schemes of distribution of impurity elements concentrations in a pyrite crystal (3-1) based on the results of X-ray spectral analysis, %: 1 is the contour of the crystal; 2 are the cracks in the crystal; 3 are the points for determining the content of chemical elements

шом (верхнерудном) уровне эрозионного среза золотого оруденения. Об этом также свидетельствует наличие в центральной и восточной частях Сухоложского рудного поля основных запасов золота, локализованных в горизонтах хомолхинской свиты, расположенных стратиграфически ниже по разрезу.

Элементы-примеси, установленные в кристаллах пирита по результатам рентгеноспектрального анализа, аналогичны элементному составу пород и руд месторождения Сухой Лог (по результатам ICP-MS анализа) [21]. Исключение составляет лишь Ag, не обнаруженное в силу низкой чувствительности анализа. Таким образом, наличие характерных элементов-примесей в пиритах и, прежде всего, As, распределенного равномерно в плоскости детально изученного полированного шлифа, свидетельствует о формировании кристаллов в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования.

На примере детально изученных полированных шлифов крупнокристаллического пирита показана возможность геохимического картирования рудных минералов (выявление зон роста кристаллов или их отсутствия, поступление более поздних растворов по трещинам), что может существенно помочь при решении вопросов, связанных с определением стадийности минералообразования, а также последовательности образования минеральных комплексов. Решение данных вопросов возможно путем систематического отбора и изучения проб пирита из рудных тел месторождений, различных горизонтов, парагенетических ассоциаций, метасоматических зон, по простирающую рудных тел.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшкин Н.П. Топоминералогия. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
2. Литошко Д.Н. Топоминералогия медно-молибденовой рудной формации Полярного Урала. – Л.: Наука, 1988. – 212 с.
3. Пшеничкин А.Я. Использование кристалломорфологии пирита при минералогическом картировании золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // Минералогическое картирование рудоносных территорий. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 60–71.
4. Savage K.S., Stefan D., Lehner S.W. Impurities and heterogeneity in pyrite: Influences on electrical properties and oxidation products // *Applied Geochemistry*. – 2008. – V. 23. – № 2. – P. 103–120.
5. Agangi A., Hofmann A., Przybyłowicz W. Trace element zoning of sulfides and quartz at sheba and fairview gold mines: Clues to mesoarchean mineralisation in the barberton greenstone belt, South Africa // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 56. – P. 94–114.
6. Agangi A., Hofmann A., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Pyrite zoning as a record of mineralization in the ventersdorp contact reef, Witwatersrand Basin, South Africa // *Economic Geology*. – 2013. – V. 108. – № 6. – P. 1243–1272.
7. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic to Palaeoproterozoic placer deposits / N. Koglin, H.E. Frimmel, W.E.L. Minter, H. Brätz // *Mineralium Deposita*. – 2010. – V. 45. – № 3. – P. 259–280.

#### Выводы

1. Химический состав крупных кристаллов пирита отличается от их стехиометрической формулы, что обусловлено наличием в их составе элементов-примесей, входящих в структуру минерала в виде механических и изоморфных примесей. Рентгеноспектральным анализом установлен перечень элементов, постоянно присутствующих в пирите: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb.
2. Содержание S и Fe, в детально изученных кристаллах пирита, распределено равномерно. Наличие в кристаллах относительно равномерно распределенного As свидетельствует о его синрудном образовании в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования и его, возможно, изоморфном вхождении в структуру минерала.
3. Наличие на западном фланге Сухоложского рудного поля кристаллов пирита кубического габитуса со слабо развитой гранью {210}, а также дырочный тип их проводимости свидетельствуют о верхнерудном уровне среза золотого оруденения.
4. Для получения более представительной информации о характере распределения изученных параметров кристаллов пирита в крупнообъемном метасоматическом ореоле необходимо проведение дополнительных исследований с обработкой существенно большего количества анализируемого материала.
5. Примененная методика комплексного изучения кристаллов пирита может быть использована при проведении прогнозно-поисковых работ на золотое оруденение в других регионах.
8. Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina // *Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – № 3. – P. 951–963.
9. Implications of pyrite geochemistry for gold mineralisation and remobilisation in the Jiaodong gold district, northeast China / S.E. Mills, A.G. Tomkins, R.F. Weinberg, H.-R. Fan // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 71. – P. 150–168.
10. Ye T., Li N. The application of pyrite LA-ICP-MS trace element analysis to gold deposits // *Scientia Geologica Sinica*. – 2015. – V. 50. – № 4. – P. 1178–1199.
11. Texture and chemistry of pyrite at Chah Zard epithermal gold-silver deposit, Iran / H. Kouhestani, M. Ghaderi, R.R. Large, K. Zaw // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 85. – P. 80–101.
12. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: Implications for ore genesis in sedimentary basins / R.R. Large, I. Mukherjee, D.D. Gregory, J.A. Steadman, V.V. Maslennikov, S. Meffre // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – № 2. – P. 423–450.
13. Textures and trace element composition of pyrite from the Bukit Botol volcanic-hosted massive sulphide deposit, Peninsular Malaysia / M.B.I. Basori, S. Gilbert, R.R. Large, K. Zaw // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – V. 158. – P. 173–185.
14. Morishita Y., Shimada N., Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Signi-



- fiance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 95. – P. 79–93.
15. Results of LA-ICP-MS sulfide mapping from Algoma-type BIF gold systems with implications for the nature of mineralizing fluids, metal sources, and deposit models / B. Gourcerol, D.J. Kontak, P.C. Thurston, J.A. Petrus // *Mineralium Deposita*. – 2018. – V. 53. – № 5. – P. 1–24.
  16. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Мацюшевский А.В. Особенности кристалломорфологии и термо-эдс пиритов золоторудных месторождений различных типов // *Известия Томского политехнического института*. – 1976. – Т. 260. – С. 39–48.
  17. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и ее использование в практике поисково-разведочных работ на золото // *Геология и геофизика*. – 1989. – № 11. – С. 65–75.
  18. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits / A.Y. Pshenichkin, Y.A. Oskina, O.V. Savinova, T.F. Dolgaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005.
  19. Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. Геохимические особенности пиритов золоторудных месторождений // *Геохимия*. – 1985. – № 1. – С. 93–104.
  20. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое значение) / А.Ф. Коробейников, В.А. Нарсеев, А.Я. Пшеничкин, П.С. Ревакин. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
  21. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // *Разведка и охрана недр*. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
  22. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании* / под ред. Н.И. Наковника. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
  23. Буряк В.А. *Метаморфизм и рудообразование*. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
  24. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
  25. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 1995. – Т. 38. – № 6. – С. 467–484.
  26. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лаверов, В.Ю. Прокофьев, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская, А.М. Спиридонов, В.И. Гребенщикова, Д.А. Куликов // *Доклады РАН*. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
  27. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia / R.R. Large, L.V. Danyushevsky, Z. Chang, V.V. Maslennikov, F. Robert // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
  28. Paragenetic relationships between pyrite, carbon, and gold at the Sukhoi Log deposit and typomorphism of the pyrite surface / V.L. Tauson, V.K. Nemerov, E.A. Razvozhzaeva, A.M. Spiridonov, S.V. Lipko, A.E. Budyak // *Doklady Earth Sciences*. – 2009. – V. 426. – № 1. – P. 690–694.
  29. Иванов А.И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // *Руды и металлы*. – 2008. – № 3. – С. 43–61.
  30. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев Ю.В. Щегольков, Э.И. Альшева, С.Е. Борисовский // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
  31. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // *Геология рудных месторождений*. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
  32. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
  33. Гаврилов Р.Ю. Геохимическая зональность рудомещающего ореола мезотермального золоторудного месторождения Западное (Ленский рудный район) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2014. – № 1. – С. 59–67.

Поступила 06.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Пшеничкин А.Я.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии золота отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гаврилов Р.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 553.411:549.324.31

## PYRITES OF WEST FLANK OF SUKHOLOZHSKOE GOLD ORE FIELD (LENSK ORE DISTRICT)

Anatoliy Ya. Pshenichkin<sup>1</sup>,  
paya@tpu.ru

Roman Yu. Gavrillov<sup>1</sup>,  
GavrillovRY@tpu.ru

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

**The relevance** of the study is caused by the need to introduce new complex methods for predicting gold ore objects into the practice of geological exploration.

**The aim** of the research is to obtain information on crystal morphology, thermo-emf, chemical composition and impurity elements of pyrite from the ore zone of the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Methods:** crystal morphology, thermal electromotive force, X-ray spectral analysis, statistical processing of geochemical data on samples of pyrite crystals taken from the ore zone of the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Results.** It was determined that the studied pyrite crystals are found most often in the form of cubes. Often on crystals there is a poorly developed face {210}. Pyrite is characterized exclusively by a hole type conductivity with a spread of thermal electromotive force values from 27 to 83 mV and close average values within the range of 58,4...67,0 mV. The chemical composition of pyrite crystals differs from their stoichiometric formula, which indicates the occurrence of isomorphic impurities (As) in the mineral structure. X-ray spectral analysis revealed the elements that are constantly present in pyrite: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. The presence of impurity elements in pyrites, typical for the ores of the Sukhoy Log deposit, and especially As, indicates pyrite synore formation during hydrothermal-metasomatic process and its possible entry in the form of isomorphic impurities into mineral structure. Pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, galena, arsenopyrite, thorianite are defined as mechanical impurities in pyrite. Based on the study of crystal morphology, thermal electromotive force, chemical composition of pyrites, and distribution of impurity elements in them, a conclusion was made on the upper ore level of the ore zone erosional section in the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Key words:**

Gold mineralization, pyrite, crystal morphology, thermal electromotive force, chemical composition, impurity elements.

## REFERENCES

1. Yushkin N.P. *Topomineralogiya* [Topomineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 288 p.
2. Litoshko D.N. *Topomineralogiya medno-molibdenovoy rudnoy formatsii Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of a copper-molybdenum ore formation of Polar Ural Mountains]. Leningrad, Nauka Publ., 1988. 212 p.
3. Pshenichkin A. Ya. Ispolzovanie kristallomorfologii piritov pri mineralogicheskoy kartirovaniy zolotorudnykh mestorozhdeniy Altai-Sayanskoy skladchatoy oblasti [Use of crystal morphology of pyrite in mineralogical mapping of gold deposits of the Altai-Sayan folded region]. *Mineralogicheskoe kartirovanie rudonosnykh territoriy* [Mineralogical mapping of ore-bearing territories]. Sverdlovsk, UNSC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1985. pp. 60–71.
4. Savage K.S., Stefan D., Lehner S.W. Impurities and heterogeneity in pyrite: Influences on electrical properties and oxidation products. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 103–120.
5. Agangi A., Hofmann A., Przybylowicz W. Trace element zoning of sulfides and quartz at sheba and fairview gold mines: Clues to mesoarchean mineralisation in the barberton greenstone belt, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 94–114.
6. Agangi A., Hofmann A., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Pyrite zoning as a record of mineralization in the ventersdorp contact reef, Witwatersrand Basin, South Africa. *Economic Geology*, 2013, vol. 108, no. 6, pp. 1243–1272.
7. Koglin N., Frimmel H.E., Minter W.E.L., Brätz H. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Palaeoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 259–280.
8. Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina. *Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 951–963.
9. Mills S.E., Tomkins A.G., Weinberg R.F., Fan H.-R. Implications of pyrite geochemistry for gold mineralisation and remobilisation in the Jiaodong gold district, northeast China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 150–168.
10. Ye T., Li N. The application of pyrite LA-ICP-MS trace element analysis to gold deposits. *Scientia Geologica Sinica*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 1178–1199.
11. Kouhestani H., Ghaderi M., Large R.R., Zaw K. Texture and chemistry of pyrite at Chah Zard epithermal gold-silver deposit, Iran. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 80–101.
12. Large R.R., Mukherjee I., Gregory D.D., Steadman J.A., Maslennikov V.V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: Implications for ore genesis in sedimentary basins. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 423–450.
13. Basori M.B.I., Gilbert S., Large R.R., Zaw K. Textures and trace element composition of pyrite from the Bukit Botol volcanic-hosted massive sulphide deposit, Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 158, pp. 173–185.
14. Morishita Y., Shimada N., Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 95, pp. 79–93.
15. Gourcerol B., Kontak D.J., Thurston P.C., Petrus J.A. Results of LA-ICP-MS sulfide mapping from Algoma-type BIF gold systems with implications for the nature of mineralizing fluids, metal sources, and deposit models. *Mineralium Deposita*, 2018, vol. 53, no. 5, pp. 1–24.
16. Pshenichkin A.Ya., Korobeynikov A.F., Matsyushevsky A.V. Osobennosti kristallomorfologii i termo-eds piritov zolotorudnykh mestorozhdeniy razlichnykh tipov [Features of a kristallo-

- morfology and thermos-EMF of pyrites of gold fields of various types]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1976, vol. 260, pp. 39–48.
17. Pshenichkin A.Ya. Pyrite crystal morphology and its use in the practice of exploration for gold. *Russian Geology and Geophysics*, 1989, no. 11, pp. 65–75. In Rus.
  18. Pshenichkin A., Oskina Y., Savinova O., Dolgaya T. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. Vol. 21. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005
  19. Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya. Geochemical features of pyrite of gold deposits. *Geochemistry*, 1985, no. 1, pp. 93–104. In Rus.
  20. Korobeynikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ya., Revyakin P.S. *Pirity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonalnost, prakticheskoe znachenie)* [Pyrites of gold fields (properties, zonality, practical value)]. Moscow, CNIGRI Publ., 1993. 213 p.
  21. Gavrilo A.M., Kryazhev S.G. Ore mineral-geochemical features of Sukhoy Log deposit. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 8, pp. 3–16. In Rus.
  22. Sher S.D. Okolorudnye izmeneniya, sopotstvuyushchie zolotokvartsevym zhilam v Lenskom zolotonosnom rayone [Wallrock alteration, associating gold-quartz veins in Lena gold district]. *Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii* [Metasomatic changes of wall rocks and their part in ore formation]. Ed. by N.I. Nakovnik. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291.
  23. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
  24. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoy Log – odno iz krupnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira (genezis, zakonomernosti razmeshcheniya orudneniya, kriterii prognozirovaniya)* [The Sukhoy Log – one of the largest gold fields in the world (genesis, regularities of mineralization placement, criteria of forecasting)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
  25. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. *Formy nakhozhdeniya metallov platinovoy gruppy i ikh genezis v zolotorudnom mestorozhdenii Sukhoy Log (Rossiya)* [Occurrence forms of platinum group metals and their genesis in the gold field Sukhoy Log (Russia)]. *Geology of the ore deposit*, 1995, vol. 38, no. 6, pp. 467–484.
  26. Laverov N.P., Prokofev V.Yu., Distler V.V., Yudovskaya M.A., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Kulikov D.A. Novye dannye ob usloviyakh rudootlozheniya i sostave rudoobrazuyushchikh flyuidov zoloto-platinovogo mestorozhdeniya Sukhoy Log [Up-to-date information on ore deposition condition and ore-forming fluid composition of gold-platinum deposit Sukhoy Log]. *Doklady RAN*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92.
  27. Large R.R., Danyushevsky L.V., Chang Z., Maslennikov V.V., Robert F. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
  28. Tauson V.L., Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Spiridonov A.M., Lipko S.V., Budyak A.E. Paragenetic relationships between pyrite, carbon, and gold at the Sukhoi Log deposit and topomorphism of the pyrite surface. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 690–694.
  29. Ivanov A.I. Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i zolotonosnost Bodaybinskogo rudnogo rayona [Main lines of a geological structure and gold content of the Bodaybinsky ore area]. *Rudy i metally*, 2008, no. 3, pp. 43–61.
  30. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shhegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskiy S.E. Wall-rock metasomatism of carbonaceous terrigenous rocks in the Lena gold district. *Geology of the ore deposit*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
  31. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Ratio of metamorphism and ore formation on a gold black-shale deposit Sukhoy Log according to U-Th-Pb-isotope SHRIMP dating of accessory minerals. *Geology of the ore deposit*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. In Rus.
  32. Kucherenko I.V., Gavrilo R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of wall-rock metasomatism in gold deposit Sukhoy Log (Lena district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
  33. Gavrilo R.Yu. Geochemical zonality of an ore-hosting halo of a mesothermal gold field Zapadnoe (Lensky ore area). *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2014, no. 1, pp. 59–67. In Rus.

Received: 6 April 2018.

#### Information about the authors

**Anatoliy Ya. Pshenichkin**, Cand. Sc., head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roman Yu. Gavrilo**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати хх.05.2018. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,75. Уч.-изд. л. 15,15.  
Заказ хх-18. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ