

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

# ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

**Инжиниринг георесурсов**

Том 326, № 7, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
Инжиниринг георесурсов**

**Редакционная коллегия**

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. 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)  
Коробочкин В.В., д-р техн. 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 (Турция)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Кирыанова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. 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 по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

**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 № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

«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
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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)

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
National Research Tomsk Polytechnic University

---



ISSN 1684-8519

# BULLETIN

## OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

**Geo Assets Engineering**

Volume 326, № 7, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

**BULLETIN  
OF THE TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY.  
Geo Assets Engineering**

**Editorial Board**

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Rihvanov 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)  
Korobochkin V.V., 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. (Turkey)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2015

**AIMS AND SCOPES**

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) and nationally (Certificate PE № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

## CONTENTS

- |   |  |
|---|--|
| <p><b>Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд</b><br/>Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Хашева З.М.</p> <p><b>Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций</b><br/>Мальнев А.И., Баховцев И.А., Зиновьев Г.С.</p> <p><b>Распределение марганца в торфяных залежах Томской области</b><br/>Архипов В.С., Бернатонис В.К.</p> <p><b>Регрессионный анализ алгоритма ранжирования результатов текстового поиска в базах данных систем геомониторинга с помощью нейронных сетей</b><br/>Тарков М.С., Кожушко О.А.</p> <p><b>Эколого-геохимическая характеристика поверхностных вод золоторудного месторождения «Пионер» Амурской области</b><br/>Ляпунов М.Ю.</p> <p><b>Модели функции плотности вероятностей для описания распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы</b><br/>Илюшин Б.Б., Митин И.В., Сиковский Д.Ф.</p> <p><b>Разработка эффективной методики оценки ресурсов углеводородов с применением сравнительно-исторического метода и геотермии как нового метода разведочной геофизики</b><br/>Искоркина А.А., Брылина И.В., Корниенко А.А., Исаев В.И.</p> <p><b>Повреждаемость основных узлов систем теплоснабжения городов Российской Федерации</b><br/>Москалёв И.Л., Литвак В.В.</p> <p><b>Влияние тепловложения при плазменной порошковой наплавке стали 10P6M5 на структуру и твердость покрытия. Наплавка одиночного валика (Ч. I)</b><br/>Хайдарова А.А., Гньюсов С.Ф.</p> <p><b>Низкомолекулярные азотистые основания и сернистые соединения в высокопарафинистых высокосмолистых нефтях</b><br/>Аюрова А.М., Герасимова Н.Н.</p> <p><b>Гидроэкологическое состояние междуречья рек Гам и Кау (Северный Вьетнам)</b><br/>Савичев О.Г., Нгуен Ван Луен</p> <p><b>Промышленно-энергетическая классификация для оценки рационального использования углей</b><br/>Иванов В.П.</p> <p><b>Литология пород Туртасской свиты и возможности их использования в качестве сырья для производства пеностеклокерамики на примере успешной площади (Тюменская область)</b><br/>Смирнов П.В., Иванов К.С., Константинов А.О.</p> <p><b>Термодинамический анализ процесса алкилирования бензола пропиленом</b><br/>Чудинова А.А., Нурмаканова А.Е., Салищева А.А., Ивашкина Е.Н.</p> <p><b>Вклад научной школы академика В.Е. Накарякова в теплофизику и теплотехнику</b><br/>Заворин А.С., Кузнецов Г.В.</p> | <p><b>6 Principles and economic efficiency of ore mining technology combination</b><br/>Golik V.I., Razorenov Yu.I., Stradanchenko S.G., Khasheva Z.M.</p> <p><b>15 Review of multilevel current source inverters of wind power stations</b><br/>Malnev A.I., Bakhovtsev I.A., Zinoviev G.S.</p> <p><b>27 Distribution of manganese in peat deposit of Tomsk region</b><br/>Arkhipov V.S., Bernatonis V.K.</p> <p><b>36 Regression analysis of geomonitoring systems database text ranking algorithm using neural networks</b><br/>Tarkov M.S., Kozhushko O.A.</p> <p><b>44 Ecological-geochemical characteristic of surface water of the gold mine «Pioneer» in Amur region</b><br/>Lyapunov M.Yu.</p> <p><b>51 Models of probability density function for describing pollutant distribution in convective planetary boundary layer</b><br/>Ilyushin B.B., Mitin I.V., Sikovsky D.Ph.</p> <p><b>60 Development of the effective technique for assessing hydrocarbon resources applying the comparative-historical method and geothermal as a new method of exploration geophysics</b><br/>Iskorkina A.A., Brylina I.V., Kornienko A.A., Isaev V.I.</p> <p><b>70 Damageability of the main knots of heat supply networks in the cities of the Russian Federation</b><br/>Moskalev I.L., Litvak V.V.</p> <p><b>81 Influence of heat input at plasma powder surfacing of M2 steel on structure and hardness of the coating. Single roller surfacing (P. I)</b><br/>Khaydarova A.A., Gnyusov S.Ph.</p> <p><b>89 Low-molecular nitrogenous bases and sulphurous compounds of highly paraffinic and highly resinous oils</b><br/>Ayurova A.M., Gerasimova N.N.</p> <p><b>96 Hydroecological condition between the Gam and Kau rivers (Northern Vietnam)</b><br/>Savichev O.G., Nguen Van Luen</p> <p><b>104 Industrial and energy classification to estimate the rational coal use</b><br/>Ivanov V.P.</p> <p><b>112 Lithology of Turtass suite rocks and opportunities of their use as a raw material for foamflass ceramics on the example of Uspenskaya area (Tyumen region)</b><br/>Smirnov P.V., Ivanov K.S., Konstantinov A.O.</p> <p><b>121 Thermodynamic analysis of benzene alkylation with propylene</b><br/>Chudinova A.A., Nurmakanova A.E., Salishcheva A.A., Ivashkina E.N.</p> <p><b>130 Contribution of the scientific school of academician V.E. Nakoryakov in thermophysics and heat engineering</b><br/>Zavorin A.S., Kuznetsov G.V.</p> |
|---|--|

УДК 504.55.054:622(470.6)

## ПРИНЦИПЫ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ РУД

**Голик Владимир Иванович,**

д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Центра геофизических исследований  
Владикавказского научного центра РАН и Правительства Республики  
Северная Осетия-Алания, Россия, РСО-Алания,  
362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а. E-mail: v.i.golik@mail.ru

**Разоренов Юрий Иванович,**

д-р техн. наук, проф., ректор Северо-Кавказского государственного  
технологического университета, Россия, РСО-Алания,  
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: yiri1963@mail.ru

**Страданченко Сергей Георгиевич,**

д-р техн. наук, проф., ректор Института сферы обслуживания  
и предпринимательства, Россия, 346500, г. Шахты,  
пр. П. Революции, д. 97. E-mail: ssg72@mail.ru

**Хашева Зарема Муратовна,**

д-р эконом. наук, проф., проректор Южного института менеджмента,  
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 216.  
E-mail: zarema\_muratovna@mail.ru

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью обеспечить увеличивающиеся каждые 10 лет вдвое потребности человечества в минеральных ресурсах и минимизировать экологический ущерб окружающей среде от катастрофической химизации продуктами горного производства.

**Цель работы:** обоснование технической возможности и экономической целесообразности комбинирования технологий разработки рудных месторождений с использованием хвостов обогащения и выщелачивания руд для управления состоянием рудовмещающих массивов и вовлечением в переработку ранее некондиционных ресурсов.

**Методы исследования:** анализ литературных источников, экспертное моделирование параметров комбинируемых технологий, интерпретация результатов практики, математическое моделирование экономических параметров производства.

**Результаты.** Обоснована техническая возможность и экономическая целесообразность комбинирования традиционных и новых технологий разработки рудных месторождений на основе критерия эффективности технологий, разработана эколого-экономическая модель эффективности использования разнопрочных закладочных смесей на основе утилизируемых хвостов обогащения и выщелачивания, рекомендована технология выщелачивания металлов из некондиционного сырья. Разработаны геомеханические условия комбинирования технологий с закладкой пустот смесями на основе хвостов обогащения и с использованием массивов из хвостов подземного выщелачивания, приведен алгоритм определения прибыли от комбинирования технологий.

**Выводы.** Комбинирование традиционных и новых технологий разработки месторождений открывает возможности экономически эффективной добычи некондиционных руд. Инструментом комбинирования технологий, отвечающих критерию сохранности земной поверхности от разрушения, является использование хвостов обогащения и выщелачивания в управлении состоянием рудовмещающего массива. Комбинирование традиционных и новых технологий разработки месторождений является реальной возможностью одновременного улучшения экономических и экологических показателей разработки месторождений полезных ископаемых.

### **Ключевые слова:**

Экономика, экология, разработка, металл, месторождение, комбинирование, технология, критерий, природосбережение, ресурсосбережение, модель, эффективность, окружающая среда, запасы, руда.

### **Введение**

Эффективность разработки месторождения полезного ископаемого определяется не только экономическими показателями применяемой технологии добычи, величиной потерь руды, влиянием применяемой техники и технологии на окружающую среду, но и критерием полноты использования добытых ресурсов, в том числе утилизации отходов.

Проблема радикального повышения полноты извлечения полезных компонентов и перевода значительных объемов некондиционного, с точки зрения применяемой сейчас техники и технологии, сырья в разряд кондиционного может быть решена комбинированием методов добычи, сочетающих использование различных видов энергии.

При оценке технологий добычи полезных ископаемых, кроме экономических критериев оценки,

пользуются критерии безопасности горных работ в виде сохранения земной поверхности от разрушения горными работами, как гарантия разделения зон горных работ и существования живого вещества. Критерий безопасности технологий отличается тем, что гарантирует сохранность земной поверхности над разрабатываемым месторождением.

При подземном способе разработки показателем степени воздействия технологии на окружающую среду является пустотность массива. Чем больше породы извлечено из недр, тем больше приток воды в пустоты, выброс газов от вентиляции, отвалы хвостов, вынос минералов из них водами и ветром и т. п.

Технология без заполнения пустот отвечает принципам природосбережения только в строго определенных условиях. Технология с обрушением пород при минимальных затратах на управление состоянием массива отличается радикальным нарушением экологии при разрушении земной поверхности.

Технология с закладкой пустот твердеющими смесями рождает проблему добычи компонентов твердеющих смесей. Стоимость твердеющих смесей при заполнении пустот стала экономическим критерием эффективности технологии. Так, в Норильском ГМК добычу инертных материалов для приготовления твердеющих смесей обеспечивает специальный рудник.

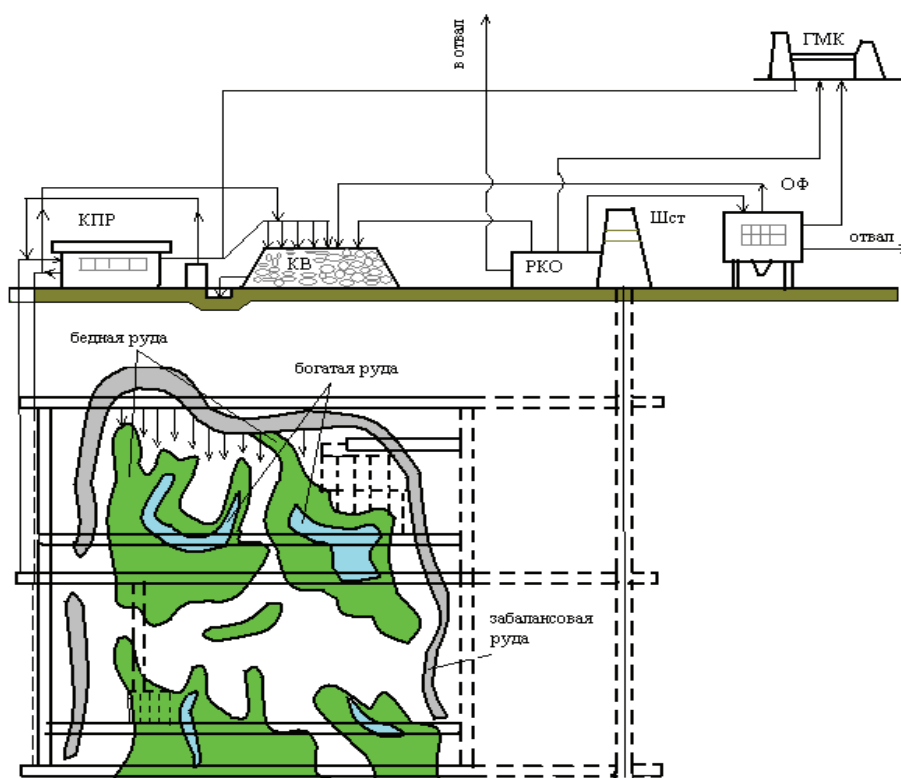
Комбинирование технологий разработки месторождений получило развитие с появлением во второй половине прошлого века технологий с использованием химической энергии для выщелачивания металлов.

#### Объекты и методы исследования

Технологии с твердеющей закладкой обеспечивают безопасность горных работ за счет возведения в выработанном пространстве искусственных массивов, но при этом на поверхность выдается весь объем добываемых руд, повышая опасность загрязнения среды химическими ингредиентами. В техногенные пустоты укладываются нередко дорогостоящие и дефицитные материалы [1].

Технологии с подземным выщелачиванием металлов из руд способствуют уменьшению объема выдаваемых на земную поверхность руд, что минимизирует последствия миграции продуктов природного выщелачивания хвостов переработки в окружающую среду [2].

Оптимальными по экономическому и экологическому критериям являются комбинированные технологии, при которых для переработки на поверхность выдается только богатая руда, а оставшаяся руда перерабатывается выщелачиванием на месте залегания (рис. 1) [3].



**Рис. 1.** Принципиальная схема комбинирования технологий разработки месторождений: Ш<sub>ст.</sub> – шахтный ствол; РКО – рудо-контролирующее отделение; ОФ – обогатительная фабрика; ГМК – горнометаллургический комплекс; КВ – кучное выщелачивание; КПР – комплекс приготовления растворов

**Fig. 1.** Principle diagram of combining technologies for field exploration: Ш<sub>ст.</sub> is the mine shaft; РКО is the ore control separation; ОФ is the washhouse; ГМК is the mining and smelting enterprise; КВ is the heap leaching; КПР is the solution preparation complex

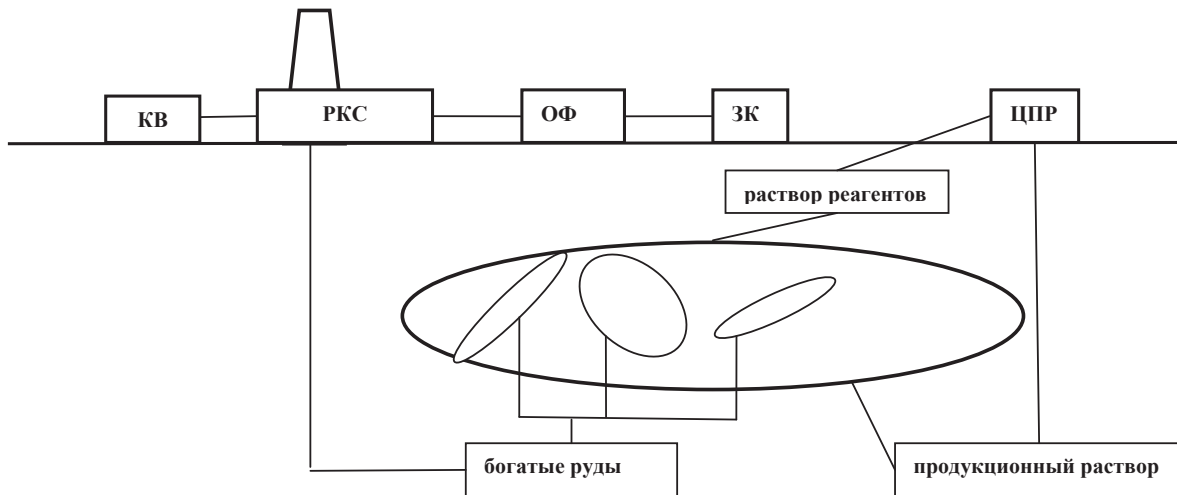


Рис. 2. Технологическая схема комбинирования способов разработки месторождений

Fig. 2. Flow chart of field exploration methods combination

Богатые руды выдаются на поверхность, дифференцируются по содержанию металлов на рудо-контролирующей станции РКС, некондиционные руды укладываются в штабель КВ, а кондиционные руды перерабатываются на обогатительной фабрике, откуда хвосты обогащения могут быть использованы на закладочном комплексе ЗК для приготовления твердеющих смесей. Оставшиеся руды выщелачиваются с приготовлением реагентов и извлечением металлов из продукционных растворов в цехе приготовления растворов (рис. 2).

Основное достоинство комбинированных технологий состоит в гарантированном сохранении земной поверхности при любых условиях локализации рудных тел и минимальном воздействии на экологию региона за счет уменьшения объемов выдачи руд на земную поверхность [4].

Эколого-экономическим критерием эффективности комбинирования технологий является дисконтированная прибыль на стадиях добычи, переработки и утилизации отходов за вычетом затрат на строительство комплексов для функционирования природоохранных технологий:

$$\Pi_k = \left\{ \begin{array}{l} V_o \Pi_{\text{цпр}} + A_{\text{тз}} (\Pi_{\text{ц}} - \Pi_{\text{пв}}) \Pi_{\text{м}} - \\ \left[ -(z_{\text{пост}} - z_{\text{пер}} V_o) + V_o + \Pi_{\text{зос}} \right] E_{\text{нп}} (1 + E_{\text{нп}}) - 1 \end{array} \right\} E_{\text{нп}} (1 + E_{\text{нп}}),$$

где  $\Pi_k$  – прибыль от комплексирования природоохранных технологий, р.;  $V_o$  – количество переработанного некондиционного сырья, т;  $\Pi_{\text{цпр}}$  – цена продуктов утилизации, р./т;  $A_{\text{тз}}$  – количество руды, добытой с твердеющей закладкой, т;  $\Pi_{\text{ц}}$  – цена стандартного вяжущего, р./т;  $\Pi_{\text{пв}}$  – цена вяжущего, р./т;  $z_{\text{пост}}$  – постоянные расходы на эксплуатацию комплексов, р./т;  $z_{\text{пер}}$  – переменные расходы на эксплуатацию комплексов, р./т;  $\Pi_{\text{зос}}$  – штрафные выплаты рудника за загрязнение окружающей среды, р.;  $E_{\text{нп}}$  – коэффициент дисконтирования.

Минимизация воздействий горных работ на окружающую среду обеспечивается уменьшением

объема обрушенных земель и площади земель, занимаемых под отвалы отходов добычи и переработки [5].

Комплекс охранных мер описывается уравнениями:

$$V_{\text{обр}} = \frac{Z \cdot V_{\text{п}}}{V_3} (1 - \kappa_y), \text{ м}^3;$$

$$S_{\text{зем}} = \frac{Z \cdot \kappa_{\text{н}}^{\text{г}} \cdot \kappa_{\text{н}}^{\text{о}} \cdot \kappa_{\text{н}}^{\text{м}}}{S_{\text{н}}} (1 - \kappa_y), \text{ м}^2,$$

где  $V_{\text{обр}}$  – объем обрушения массива и земной поверхности над ним,  $\text{м}^3$ ;  $Z$  – запасы полезного ископаемого,  $\text{м}^3$ ;  $\kappa_{\text{н}}^{\text{г}}$  – коэффициент извлечения при горном переделе, доли ед.;  $\kappa_{\text{н}}^{\text{о}}$  – коэффициент извлечения при обогащении, доли ед.;  $\kappa_{\text{н}}^{\text{м}}$  – коэффициент извлечения при металлургическом переделе, доли ед.;  $\kappa_y$  – коэффициент утилизации отходов добычи и переработки, доли ед.;  $V_{\text{п}}$  – объем образованных в массиве пустот,  $\text{м}^3$ ;  $V_3$  – объем заложенных пустот,  $\text{м}^3$ ;  $S_{\text{зем}}$  – площадь земли для хранения отходов,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{н}}$  – норматив отведения земли для хранения отходов,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

Использование для закладки пустот хвостов обогащения считается эффективным только при отработке богатых участков месторождений. Если же оценивать уменьшение ущерба окружающей среде при хранении хвостов, то становится эффективной разработка и менее богатых руд [6].

Одно из главных препятствий на пути закладочных технологий – высокая стоимость стандартных вяжущих для приготовления твердеющих смесей [7].

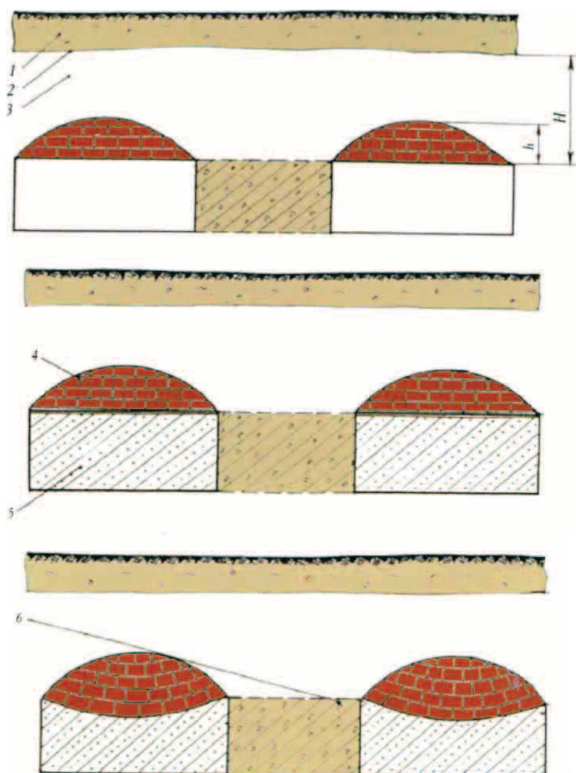
В настоящее время использование хвостов обогащения руд для приготовления твердеющих смесей хорошо освоено [8]. Существует много типов закладочных комплексов, позволяющих оптимизировать процесс приготовления смесей по стоимостным и прочностным факторам [9].



Закладка выработанного пространства твердеющими смесями стала главным фактором управления геодинамикой рудного участка путем изменения параметров технологии [10].

Нами установлено, что из хвостов обогащения возможно производство вяжущих для изготовления твердеющих смесей путем их переработки в аппаратах-активаторах с получением активной мелкой фракции. Использование такого вяжущего позволяет окупить затраты на переработку хвостов.

Безопасность комбинирования обеспечивается закладкой пустот твердеющими смесями дифференцированной прочности, зависящей от выполняемой функции искусственного массива (рис. 3).



**Рис. 3.** Функции искусственных массивов при различной устойчивости пород: 1 – наносы; 2 – граница рыхлых отложений; 3 – налегающие породы; 4 – структурные блоки пород; 5 – малопрочные твердеющие смеси; 6 – прочные твердеющие смеси; вверху – в крепких породах; посередине – при сохранении плоской кровли в пределах свода естественного равновесия; внизу – при обрушении кровли в пределах свода естественного равновесия;  $H$  – глубина работ,  $m$ ;  $h$  – высота свода естественного равновесия

**Fig. 3.** Functions of concrete blocks at different rock rigidity: 1 – drifts; 2 – boundary of soft sediments; 3 – overlying rocks; 4 – rock structural blocks; 5 – soft setting mixtures; 6 – solid setting mixtures; at the top – in solid beds; in the middle – when preserving flat roof within the natural self-supporting arch; at the bottom – at roof collapse within the natural self-supporting arch;  $H$  – depth of working,  $m$ ;  $h$  – height of natural self-supporting arch

В местах наибольших напряжений создаются более прочные массивы, а во внутренних зонах за-

кладочного пространства – менее прочные. Это позволяет заменить до 40–60 % твердеющей смеси на цементной основе более доступными и дешевыми хвостами обогащения или оставляемыми в выщелоченном блоке хвостами выщелачивания.

При использовании для приготовления твердеющих смесей хвостов обогащения эффективность технологии с учетом экологического ущерба определяется решением модели:

$$\Pi_x = \frac{\sum_1^{n_0} (C_{TO} - Z_{OO} - Z_{OM}) \cdot Q_0}{t_0} + C_{III}^O + \frac{\sum_1^{n_M} (C_{TM} - Z_{OM} - Z_{MM}) \cdot Q_M}{t_M} + C_{III}^M,$$

где  $\Pi_x$  – годовая прибыль от переработки хвостов, р/т;  $C_{TO}$  – стоимость реализации продукции переработки хвостов обогащения, р/т;  $Z_{OO}$  – затраты на обогащение хвостов обогащения, р/т;  $Z_{OM}$  – затраты на металлургический передел хвостов обогащения, р/т;  $n_0$  – количество извлекаемых компонентов из хвостов обогащения;  $Q_0$  – масса хвостов обогащения, т;  $t_0$  – время переработки хвостов обогащения, год;  $C_{III}^O$  – штрафы за хранение хвостов обогащения, р./год;  $C_{TM}$  – реализация продуктов переработки хвостов металлургии, р/т;  $Z_{OM}$  – затраты на обогащение хвостов металлургии, р./т;  $Z_{MM}$  – затраты на металлургический передел хвостов металлургии, р/т;  $n_M$  – количество извлекаемых компонентов из хвостов металлургии;  $Q_M$  – масса хвостов металлургии, т;  $t_M$  – время переработки хвостов металлургии, лет;  $C_{III}^M$  – штрафы за хранение хвостов, р/год.

Экономическая эффективность комбинирования технологий:

$$\Theta = \left[ \frac{3\delta}{A\delta} K_R^A K_P^T + \left( \frac{\Delta\Theta_{\Phi} + \Delta\Theta_K}{A_{\Phi}} \right) - \frac{3_{\Phi}}{A_{\Phi}} \right] A \cdot r,$$

где  $\Theta$  – экономический эффект сопряжения технологий;  $3_{\Phi}$ ,  $3_{\Phi}$  – затраты на единицу основной продукции – металла базового и оптимизированного вариантов технологий, ден. ед.;  $K_R^A$ ,  $K_P^T$  – коэффициенты динамичности объемов производства и времени;  $\Delta\Theta_{\Phi}$ ,  $\Delta\Theta_K$  – приведенные эксплуатационные и капитальные расходы базового и оптимизированного вариантов технологий, ден. ед.;  $A$  – годовой объем выпуска продукции по оптимизированной технологии, ед.;  $r$  – коэффициент риска рыночных операций.

Методика выбора согласованных эколого-экономических решений базируется на системной оценке альтернативных дискретно-непрерывных вариантов технологий комбинирования [11]. Каждый из вариантов представляет собой количественное и качественное соотношение между объемами добычи минералов, первичных и вторичных минеральных ресурсов и объемами утилизации отходов [12].

Экономия создается, если затраты на управление массивом закладкой не превышают величины полученного дополнительно продукции: металлов и мелкофракционного сырья для народного хозяйства и уменьшения компенсационных выплат.

Эффективность использования разнопрочной закладки [13]:

$$\sum_{t=1}^{t_p} \Pi_t = \sum_{t=1}^{t_p} Q(\Pi_{\text{ЦПР}} - C_{\text{др}}) \frac{1}{(1 + \dot{A})^{t_p-1}} - \sum_{t=1}^{t_c} C_{\text{ПОР}} (1 - \dot{A}_{\text{нт}}),$$

где  $Q$  – величина запасов, обрабатываемых с разнопрочной закладкой, т;  $\Pi_{\text{ЦПР}}$  – цена 1 т добытой руды с разнопрочной закладкой и ее переработки на РОФ, р./т;  $C_{\text{др}}$  – затраты на добычу 1 т руды с разнопрочной закладкой и ее переработки на РОФ, р./т;  $C_{\text{ПОР}}$  – затраты на приобретение оборудования для приготовления смесей в  $t$ -м году, р./т.

Затраты на добычу 1 т руды с разнопрочной закладкой:

$$C_{\text{др}} = C_{\text{дс}} - \frac{Z_s}{\gamma} + \left( \frac{Z_s \varphi_s + Z_n \varphi_n + Z_i \varphi_i}{\gamma} \right) + C_o,$$

где  $C_{\text{дс}}$  – затраты на добычу 1 т руды при традиционной технологии с твердеющей закладкой, р./т;  $C_o$  – затраты на переработку 1 т руды, р./т;  $Z_s$ ,  $Z_n$  и  $Z_i$  – затраты на возведение 1 м<sup>3</sup> твердеющей, породной и упрочненной породной закладки соответственно, р./м<sup>3</sup>;  $\varphi_s$ ,  $\varphi_n$  и  $\varphi_i$  – доля использования твердеющей, породной и упрочненной породной закладки в общем объеме закладочных работ в масштабах камеры, в долях единицы;  $\gamma$  – плотность руды, т/м<sup>3</sup>.

Применение хвостов влияет на экономику горного предприятия, технико-экономические показатели работы которого изменятся по сравнению с показателями базового варианта.

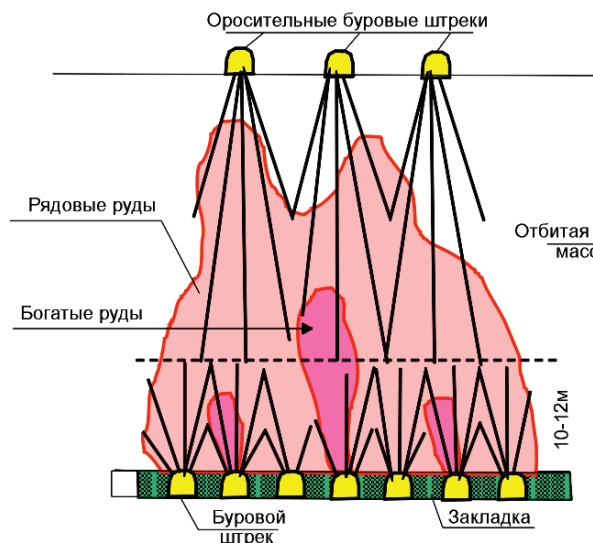


Рис. 4. Комбинированная отработка рудного тела

Fig. 4. Ore body combined processing

а) при базовом варианте:

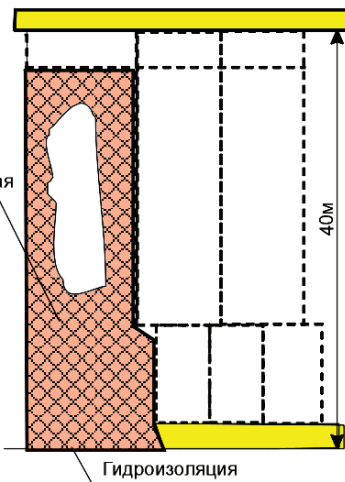
$$\sum_{t=1}^{t_p} \Pi_{\text{РБГКт}} = \sum_{t=1}^{t_p} A_{\text{бКт}} (\Pi_{\text{ДбКт}} - C_{\text{ДбКт}}) \frac{1}{(1 + E)^{t_p-1}};$$

б) при новом варианте:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{t_p} \Pi_{\text{прКт}} &= \frac{\sum_{t=1}^{t_p} A_{\text{Дбт}} (\Pi_{\text{ДбКт}} - C_{\text{ДбКт}})}{(1 + E)^{t_p-1}} + \\ &+ \frac{1}{(1 + E)^{t_c}} \frac{\sum_{t=1}^{t_{\text{CO}}} \Delta K_{\text{От}} (1 + E_K)^{t_{\text{CO}}}}{(1 + E)^{t_{\text{CO}}-1}} + \\ &+ \frac{1}{(1 + E)^{t_c}} \frac{\sum_{t=1}^{t_p-t_c} A_{\text{пт}} \gamma_3 (C_{\text{ТЗ}} + C_{\text{От}} + \Pi_{\text{От}})}{(1 + E)^{t_p-t_c-1}} \times \\ &\times \frac{1}{(1 + E)^{t_c}} \frac{\sum_{t=1}^{t_p-t_c} \gamma_{\text{КОСт}}}{(1 + E)^{t_p-t_c-1}}, \end{aligned}$$

где  $A_{\text{бКт}}$  и  $A_{\text{Кт}}$  – производственная мощность рудника при базовом и новом (с реализацией хвостов) вариантах в  $t$ -й год, т/год;  $\Pi_{\text{ДбКт}}$  и  $\Pi_{\text{ДКт}}$  – извлекаемая ценность добываемого и реализуемого продукта при базовом и новом (с реализацией хвостов) вариантах в  $t$ -й год, т/год;  $C_{\text{ДбКт}}$  и  $C_{\text{ДКт}}$  – затраты на переработку хвостов при базовом и новом вариантах в  $t$ -й год, р./т;  $\gamma_{\text{КОСт}}$  – снижение ущерба окружающей среде за счет уменьшения площадей, занятых хвостов, в  $t$ -й год, р./год.

При использовании технологий добычи руд с выщелачиванием металлов залежь разделяют на эксплуатационные блоки, в которых проходят подготавительные и нарезные выработки, оформляют отрезную щель и днище камеры [14]. Извлекаемые в первую стадию богатые руды создают внутри блока компенсационное пространство для



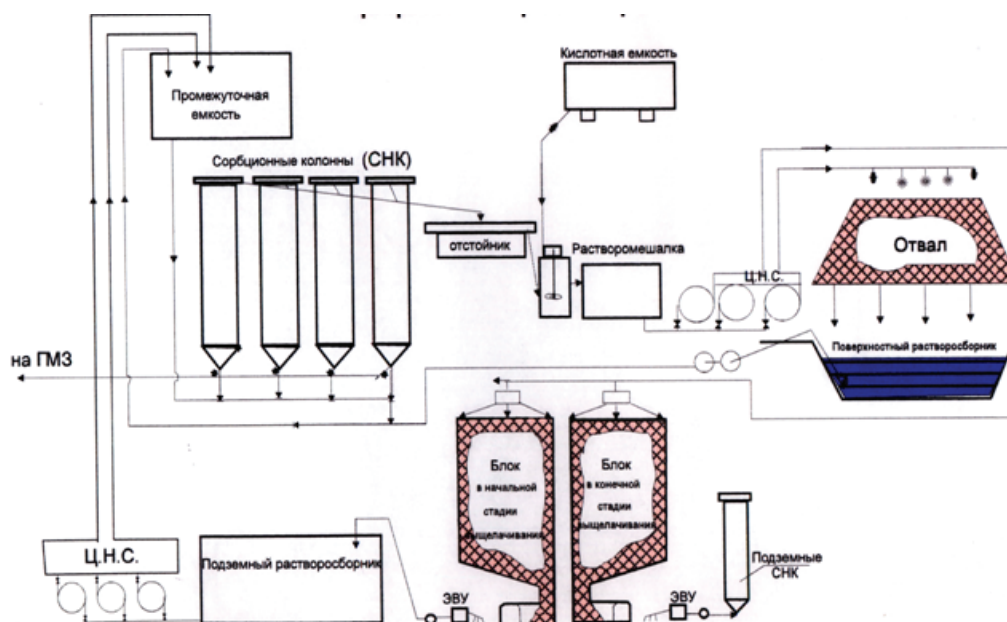


Рис. 5. Утилизация хвостов переработки при комбинировании технологий

Fig. 5. Tailings processing in the combined technique

дробления руды второй очереди до необходимых размеров (рис. 4).

Технология выщелачивания металлов позволяет использовать хвосты подземного выщелачивания в качестве твердеющих смесей прочностью до 0,5 МПа, а хвосты отвального и кучного выщелачивания для приготовления твердеющих смесей (рис. 5) [15].

Свойства используемых и в качестве инертных, и в качестве вяжущих компонентов хвостов переработки могут быть улучшены активацией в дезинтеграторе (рис. 6) [16].

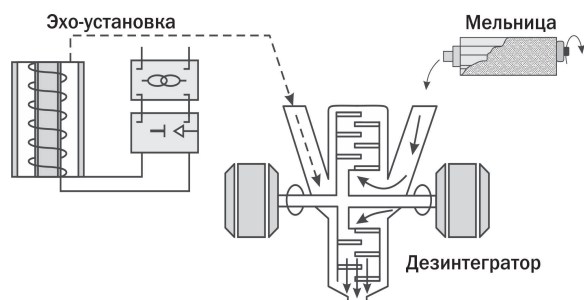


Рис. 6. Схема корректировки свойств хвостов обогащения в дезинтеграторе: ЭХО – получение реагентов для выщелачивания в установке электро-химической очистки

Fig. 6. Diagram of correcting tailing properties in disintegrator: ЭХО is obtaining the reagents for leaching flowoff in the electrochemical treating unit

Конструкция дезинтегратора позволяет не только активировать как инертные, так и вяжущие компоненты хвостов обогащения, но и извлекать из них металлы до уровня санитарных норм [17]. Комбинирование технологий снижает масштабы загрязнения окружающей среды металлами, поэтому полученный эффект увеличивается на

величину предотвращаемого ущерба от выноса металлов в экосистемы окружающей среды [18]:

$$Y = f(M_c, M_r, Q, a, T) = \sum_{n=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T [(Q_a + Q_n + Q_m)(a_r^x - a_k^x)] \times (\sum K_c K_y K_T \sum K_6 K_r K_{вр} K_r) \rightarrow \max,$$

где  $Y$  – сумма факторов поражения окружающей среды;  $M_c$  – количество минералов в хвостах;  $M_r$  – количество минералов в атмосферных водах;  $P$  – предприятия переработки хвостов;  $P$  – количество минеральных компонентов;  $O$  – операции переработки;  $T$  – время переработки;  $Q_a, Q_n, Q_m$  – количество реагентов атмосферного, подземного и технологического происхождения, соответственно;  $a_r^x, a_k^x$  – исходная и конечная концентрация минералов;  $K_c$  – коэффициент самоорганизации;  $K_y$  – коэффициент утечки продуктов выщелачивания;  $K_T$  – коэффициент дальности утечки растворов;  $K_6$  – коэффициент влияния на биосферу;  $K_r$  – коэффициент влияния загрязнения на другие регионы;  $K_{вр}$  – коэффициент реализации опасности со временем;  $K_r$  – коэффициент риска поражения окружающей среды от неучтенных факторов.

Реализация принципов комбинирования традиционных и новых технологий разработки месторождений с вовлечением в производство в настоящее время омертвленных запасов некондиционных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и заменяет необходимость вовлечения в эксплуатацию новых месторождений, что отвечает стратегии развития горной промышленности России [19]. Описанная технология безотходного производства металлов

составляет часть стратегии национальной ресурсной безопасности России [20].

### Выводы

Комбинирование традиционных и новых технологий разработки месторождений открывает возможности экономически эффективной добычи некондиционных руд. Геомеханическим условием возможности комбинирования технологий, отвечающих критерию сохранности земной поверхности от разрушения, является использование хвостов обогащения и выщелачивания в управлении состоянием рудовмещающего массива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новая технология и оборудование для высокопроизводительной закладки выработанного пространства при подземной обработке месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, В.А. Арсентьев, В.В. Квитка, Р.Ш. Маннанов // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 66–70.
2. Лизункин В.М., Гаврилов А.А., Морозов А.А. Отработка маломощных крутопадающих урановых жил способом подземного выщелачивания // Горный журнал. – 2013. – № 8.2. – С. 78–82.
3. Лизункин В.М., Морозов А.А., Бейдин А.В. Комбинированная геотехнология добычных работ с рентгенорадиометрической сортировкой и выщелачиванием урана из бедной рудной массы в подземных условиях. // Горный журнал. – 2013. – № 8.2. – С. 82–86.
4. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА / В.И. Голик, О.Н. Полухин, А.Н. Петин, В.И. Комащенко // Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 61–64.
5. Уманец В.Н., Бугаева Г.Г., Когут А.В. Методы оценки экологического риска для управления экологической безопасностью при производстве открытых горных работ // ГИАБ. – 2014. – № 8. – С. 112–116.
6. Сергеев С.В., Зайцев Д.А. Исследование температурного режима закладочного массива при разработке Яковлевского железорудного месторождения // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 68–73.
7. Голик В.И. Управление состоянием массива. – М.: Инфра-М, 2014. – 135 с.
8. Ермолович Е.А., Шок И.А. Техногенные отходы в составе закладочных композиционных материалов. Technogenic waste as part of filling composite materials // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 56–60.
9. Зимин Ю.И., Лейзерович С.Г. Промышленный закладочный комплекс – технологическая основа безотходного производства железорудного концентрата. Industrial stowing complex – technological basis of non-waste production of iron ore concentrate // Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 76–82.
10. Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного простран-

ства. Эффективность использования недр и технико-экономические показатели горного производства повышаются применением технологии выщелачивания металлов на месте залегания руд с использованием хвостов подземного выщелачивания для управления состоянием рудовмещающих массивов.

Комбинирование традиционных и новых технологий разработки месторождений является реальной возможностью одновременного улучшения обычно антагонистически взаимодействующих экономических и экологических факторов разработки месторождений полезных ископаемых.

- ства. The impact of geodynamic conditions of ore mining area to the technology of sewage treatment works with stowing // ГИАБ. – 2014. – № 11. – С. 132–136.
11. Борзаковский Б.А., Русаков М.И., Генкин М.В. Технология добычи руды с закладкой на вяжущем из хлористого кальция // ГИАБ. – 2014. – № 4. – С. 114–118.
12. Трубецкой К.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 45–49.
13. Голик В.И. Природоохранные технологии разработки рудных месторождений. – М.: Инфра-М, 2014. – 190 с.
14. Техничко-экономическая оценка эффективности блочного подземного выщелачивания урана из бедных руд Стрельцовского рудного поля / А.А. Морозов, А.П. Смагин, Г.Ф. Безносос, А.Н. Юртаев // Горный журнал. – 2013. – № 8.2. – С. 129–131.
15. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – М.: Инфра-М, 2014. – 131 с.
16. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt. – Freiberg: Technische University Bergakademie, 2014. – 413 p.
17. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremkov A.B. Recycling of ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368.
18. Golik V.I., Komachshenko V.I., Drebenstedt C. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Disintegrators // Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference. – Dresden, Germany, 14–19 October 2013. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 1047–1057. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7\_101.
19. Golik V.I., Komachshenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources Disintegrators // Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference. – Dresden, Germany, 14–19 October 2013. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 1101–1107. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7\_107.
20. Белова А.Г., Корнилков С.В. О технологической платформе «Твердые полезные ископаемые» // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 12–18.

Поступила 18.11.2014 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

## PRINCIPLES AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ORE MINING TECHNOLOGY COMBINATION

**Vladimir I. Golik,**

Center of Geophysical Researches at Vladikavkaz Scientific Center of RAS and the Government of the Republic of North Ossetia-Alania, 93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, North Ossetia-Alania, Russia. E-mail: v.i.golik@mail.ru

**Yury I. Razorenov,**

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, North Ossetia-Alania, Russia. E-mail: yiri1963@mail.ru

**Sergey G. Stradanchenko,**

Institute for the service sector and entrepreneurship, 97, Revolution Avenue, Shakhty, 346500, Russia. E-mail: ssg72@mail.ru

**Zarema M. Khasheva,**

Southern Institute of Management, 216, Stavropolskaya street, Krasnodar, 350040, Russia. E-mail: zarema\_muratovna@mail.ru

*Relevance of the work is caused by the necessity to provide the needs of humanity in mineral resources, doubled every 10 years, and to minimize environmental damage from the disastrous use of chemicals with mining products.*

**The main aim** of the research is to study the feasibility and economic efficiency of combining the technologies of exploring ore deposits using tailings and ore leaching to control the state of ore-hosting arrays and involvement previously substandard resources into processing.

**Methods:** the analysis of literature, expert modeling of the parameters of combinable technologies, interpretation of practical results, mathematical modeling of production economic parameters.

**Results.** The authors have substantiated technical feasibility and economic efficiency of combining traditional and new technologies to develop ore deposits based on the criterion of technology efficiency, developed the ecological-economic model of efficient use of different strengths filling mixtures based on recyclable tailings and leach technology, recommended the metals leaching technique from substandard raw materials. Geomechanical conditions of combining technologies filling the cavities with mixtures based on tailings and using arrays of tailings of underground leaching were developed. The paper introduces the algorithm for determining the profits of technologies combination.

**Conclusions.** Combination of traditional and new field exploration technologies opens up the possibilities of cost-effective production of sub-standard ores. The use of tailings and leaching in controlling the state of the ore-hosting array is the instrument of combining technologies, which meet the criteria of preserving the earth's surface from destruction. The combination of traditional and new field exploration technologies is a real possibility of improving the economic and environmental indices of exploitation of mineral deposits.

### Key words:

Economy, ecology, engineering, metal, mine, combining, technology, criterion, nature conservation, resource conservation, model, efficiency, environment, reserves, ore.

### REFERENCES

1. Kaplunov D.R., Rynnikova M.V., Arsentev V.A., Kvitka V.V., Mannanov R.Sh. Novaya tekhnologiya i oborudovanie dlya vysokoproizvoditelnoy zakladki vyrabotannogo prostranstva pri podzemnoy otrabotke mestorozhdeniy [New technology and equipment for high-stowing at underground mining of deposits]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 66–70.
2. Lizunkin V.M., Gavrilov A.A., Morozov A.A. Otrabotka malomoshchnykh krutopadayushchikh uranovykh zhil sposobom podzemnogo vyshchelachivaniya [Testing low-power steeply dipping veins of uranium in-situ leaching method]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 8.2, pp. 78–82.
3. Lizunkin V.M., Morozov A.A., Beydin A.V. Kombinirovannaya geotekhnologiya dobychnykh rabot s rentgenoradiometricheskoy sortirovkoj i vyshchelachivaniem urana iz bednoy rudnoy massy v podzemnykh usloviyakh [Combined Geotechnology mining operations with X-ray radiometric sorting and leaching of uranium ore from a poor masses in underground conditions]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 8.2, pp. 82–86.
4. Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashchenko V.I. Ekologicheskie problemy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy KMA [Environmental problems of exploring KMA ore deposits]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 4, pp. 61–64.
5. Umanets V.N., Bugaeva G.G., Kogut A.V. Metody otsenki ekologicheskogo riska dlya upravleniya ekologicheskoy bezopasnostyu pri proizvodstve otkrytykh gornykh rabot [Methods for assessing the ecological risk of environmental safety management in the production of open pit mining]. *GIAB*, 2014, no. 8, pp. 112–116.
6. Sergeev S.V., Zaytsev D.A. Issledovanie temperaturnoy rezhima zakladochnogo massiva pri razrabotke Yakovlevskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Research of filling mass temperature mode when developing Yakovlevskoe iron ore deposit]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 68–73.
7. Golik V.I. *Upravlenie sostoyaniem massiva* [Controlling the array state]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 135 p.
8. Ermolovich E.A., Shok I.A. Tekhnogennyye otkhody v sostave zakladochnykh kompozitsionnykh materialov [Technogenic wastes in filling composite materials]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 56–60.
9. Zimin Yu.I., Leyzerovich S.G. Promyshlenny zakladochnyy kompleks – tekhnologicheskaya osnova bezotkhodnogo proizvodstva zhelezorudnogo kontsentrata [Industrial filling complex is the

- technological base of iron-ore concentrate production]. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 4, pp. 76–82.
10. Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Vliyaniye geodinamicheskikh usloviy otrabotki rudnogo uchastka na tekhnologiyu ochistnykh robot s zakladkoy vyrabotannogo prostranstva [Influence of geodynamic conditions of processing ore area on second working technology with goaf stowing]. *GIAB*, 2014, no. 11, pp. 132–136.
  11. Borzakovskiy B.A., Rusakov M.I., Genkin M.V. Tekhnologiya dobychi rudy s zakladkoy na vyazhushchem iz khloristogo kaltsiya [Ore production technology with stowage on potassium chloride binder]. *GIAB*, 2014, no. 4, pp. 114–118.
  12. Trubetskoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. O novykh podkhodakh k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya gornogo proizvodstva [On new approaches to provide mining sustainable development]. *Gorny zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 45–49.
  13. Golik V.I. *Prirodookhrannyye tekhnologii razrabotki rudnykh mestorozhdeniy* [Environmental technologies of exploring ore deposits]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 190 p.
  14. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., Yurtaev A.N. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti blochnogo podzemnogo vyshchelachivaniya urana iz bednkh rud Streltsovskogo rudnogo polya [Technical and economic assessment of the efficiency of uranium block underground leaching from poor ores of Streltsov's ore field]. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 8.2, pp. 129–131.
  15. Golik V.I. *Spetsialnye sposoby razrabotki mestorozhdeniy* [Special methods of exploring deposits]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. 131 p.
  16. Polukhin O.N., Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt C. *Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production*. Freiberg, Technische University Bergakademie, 2014. 413 p.
  17. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremkov A.B. Recycling of ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368.
  18. Golik V.I., Komachshenko V.I., Drebenstedt C. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Disintegrators. *Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference*. Dresden, Germany, 14–19 October 2013. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 1047–1057. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7\_101.
  19. Golik V.I., Komachshenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources Disintegrators. *Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference*. Dresden, Germany, 14–19 October 2013. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 1101–1107. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7\_107.
  20. Belova A.G., Kornilkov S.V. *O tekhnologicheskoy platforme «Tverdye poleznyye iskopaemye»* [Technological platform «Solid minerals»]. *Gorny zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 12–18

Received: 18 November 2014.

УДК 621.314.26

## ОБЗОР МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ ТОКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

**Мальнев Алексей Иванович,**

аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: malnev54@yandex.ru

**Баховцев Игорь Анатольевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: igor\_55@ngs.ru

**Зиновьев Геннадий Степанович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: genstep@mail.ru

*Обзор посвящен однофазным и трехфазным многоуровневым инверторам тока для ветроэнергетических станций. Обзор выполнен в основном по материалам зарубежной печати. Во введении дается краткое обоснование актуальности использования многоуровневых инверторов в ветроэнергетических установках, а также сравнение автономных инверторов тока и напряжения. Перечислены достоинства инвертора тока и области его применения. Далее рассматриваются однофазные варианты. Такие топологии просты в реализации и понимании процесса формирования уровней выходного тока. Для них определяется базовая топология, на основании которой для некоторых топологий приводятся сравнительные характеристики по числу силовых элементов и системам управления. Отдельное внимание уделяется топологиям с уменьшенным числом силовых ключей. Кроме того, акцентируется внимание на однофазных многоуровневых инверторах тока, построенных с использованием неизолированных ключей. Рассмотрены особенности их управления, достоинства и недостатки. Применительно к трехфазным многоуровневым автономным инверторам тока также определяется базовая топология. Описываются два метода преобразования трехфазных схем при использовании принципа дуальности инверторов тока и напряжения и несколько топологий трехфазных многоуровневых инверторов тока, полученных с использованием данного принципа. В статье говорится о проблеме баланса токов в многоуровневых инверторах тока в отдельных каскадах и о принципах его реализации. Эта проблема аналогична проблеме баланса напряжений в многоуровневых инверторах напряжения. Приводятся трехфазные топологии, которые формируются из однофазных ячеек. Это актуально для мощных преобразователей. Рассмотрен новый класс многоуровневых топологий автономных инверторов тока, который называется квази-многоуровневые топологии. Описываются особенности их работы и достоинства. Для каждой из описанных в статье топологий приводится краткое описание способа управления. В конце статьи по итогам проведенного обзора предложена классификация различных топологий многоуровневых автономных инверторов тока с использованием нескольких критериев.*

### **Ключевые слова:**

*Ветроэнергетическая станция, автономный инвертор тока, многоуровневый автономный инвертор тока, система управления, способ управления, принцип дуальности, квази-многоуровневые топологии, классификация топологий автономных инверторов тока.*

### **Введение**

Наиболее перспективными источниками возобновляемой энергии на сегодняшний день являются ветроэнергетика и солнечная энергия [1]. Причем первая характеризуется более быстрыми темпами развития и освоения генерируемых мощностей [1, 2]. Одной из областей техники, где проблема наращивания мощности особенно актуальна, является именно ветроэнергетика. В соответствии с европейскими стандартами к энергосистеме не может быть подключен генератор мощностью менее 1 МВт, а лучше, с целью снижения стоимости 1 кВт/ч ветроэнергии, 5–10 МВт [2].

Увеличение мощности неизбежно приводит к одновременному повышению напряжения сети, что обусловлено необходимостью снижения токовых нагрузок на линии электропередачи. Поэтому в современных ветроэнергетических станциях вместо низковольтного диапазона напряжений *LV*

(*Low Voltage*) используется диапазон средних и высоких напряжений *MV* (*Medium Voltage*). По мнению специалистов компании SEMIKRON, в этом диапазоне напряжений, как с экономической, так и технической точек зрения, целесообразнее использовать многоуровневые топологии *dc-ac* преобразователей (инверторов) на базе силовых ключей с рабочим напряжением 1700 В [1, 2].

За всю историю силовой и преобразовательной техники было разработано и сконструировано множество различных по функциональности и областям применения автономных инверторов электрической энергии. Но всё это многообразие можно разделить на две группы: инверторы напряжения и инверторы тока.

Оптимальные массогабаритные показатели, низкая стоимость и простота реализации автономных инверторов напряжения (АИН) сделали их широко распространенными. В настоящее время

АИН находят применение во всех областях промышленности и техники. Так дело обстоит только для малых и средних мощностей до 1 МВт. Дело в том, что основным недостаток АИН – это высокое содержание гармоник высшего порядка в выходном напряжении и входном токе [3]. Для мощного электропривода необходимо применять различные фильтрующие устройства, которые подчас дороже и больше самого преобразователя.

Автономные инверторы тока (АИТ) характеризуются большими массогабаритными показателями, нежели АИН, ввиду наличия дросселя с большой индуктивностью в звене постоянного тока. Но у АИТ существуют и несомненные достоинства.

В статье [4] приведен сравнительный анализ АИТ и АИН. Можно выделить следующие основные преимущества АИТ перед АИН:

- на входе АИН установлен энергоёмкий емкостной фильтр, разряд которого при возможных нарушениях в работе инвертора приводит к закорачиванию звена постоянного тока и выходу из строя полупроводниковых ключей. Из-за частых отказов в динамических режимах конденсаторов само наличие фильтра снижает надежность АИН [5];
- в составе АИТ отсутствует относительно сложный реверсивный выпрямитель с отдельным управлением, наличие которого в АИН принципиально необходимо для обеспечения режима рекуперативного торможения асинхронного двигателя.

На основании анализа, представленного в [4], можно сделать вывод, что преобразователи тока обладают большей надежностью, нежели преобразователи напряжения. Несмотря на то, что технические возможности АИН шире, там, где применение АИТ возможно, должны использоваться именно они.

Данный обзор посвящен топологиям многоуровневых автономных инверторов тока, как однофазным, так и трехфазным. Проведенный авторами анализ показывает, что подобного рода статьи, за исключением работы [6], посвященной многоуровневым АИН, в отечественной технической литературе отсутствуют. Этот факт делает актуаль-

ным настоящий обзор на фоне всевозрастающего интереса к высокомоощным многоуровневым топологиям автономных инверторов и проблемам электромагнитной совместимости мощных преобразователей [7].

#### Классическая топология однофазного многоуровневого автономного инвертора тока

Вначале необходимо определиться с базовой схемой, относительно которой будут выноситься некоторые заключения о рассматриваемых в дальнейшем топологиях. Это необходимо для проведения краткого сравнительного анализа между рассматриваемыми топологиями однофазных многоуровневых (МУ) АИТ. В настоящее время к подобным топологиям проявляется повышенный интерес. В первую очередь это связано с возможностью построения на их основе каскадных МУ-преобразователей [8], а также с возможностью разделения мощности по фазам для трехфазного электропривода, что особенно актуально при больших мощностях преобразуемой энергии [9, 10].

Опираясь на принцип дуальности инверторов напряжения и тока [11, 12], в качестве классической топологии однофазного МУ АИТ целесообразно выбрать схему, которая в трехуровневом варианте представлена на рис. 1, а и описана подробно в статье [12]. Здесь и далее используются рисунки из оригинальных статей. Если убрать токоразделяющие индуктивности  $L_p$  и  $L_n$  и добавить еще один источник постоянного тока, то получится более понятная и известная топология: две мостовые схемы АИТ, работающие параллельно на общую нагрузку (рис. 1, б).

По образу данной схемы можно создавать более сложные многоуровневые структуры. Несложно заметить, что для классической топологии справедливо следующее: для формирования  $n$  уровней выходного тока необходимо использовать  $4(n-1)$  силовых ключей и  $2(n-2)$  токоразделяющих индуктивностей. Например, схема трехуровневого АИТ будет содержать 8 ключей и 2 индуктивности, а схема четырехуровневого АИТ – 12 ключей и 4 индуктивности.

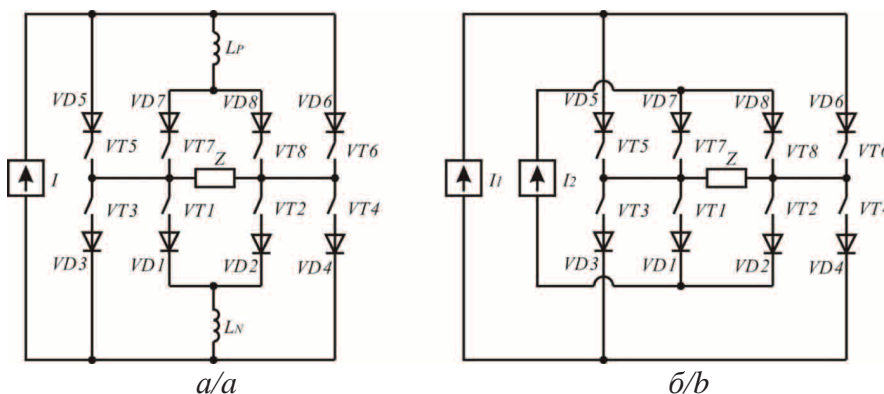


Рис. 1. Классическая (базовая) топология трехуровневого однофазного АИТ

Fig. 1. Classical (basic) topology of three-level one-phase current source converter (CSC)



В качестве алгоритма управления для базовой схемы (рис. 1, б) можно выбрать скалярную синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (СШИМ). Опорные сигналы для разных групп ключей (относящиеся к источнику тока  $I_1$  и  $I_1$ ) следует сдвинуть на соответствующий угол (для трехуровневой схемы это половина периода) для получения явно выраженной многоуровневой кривой тока в нагрузке [13].

Для схемы с токоразделяющими индуктивностями алгоритм так же основан на СШИМ, но с некоторым усложнением. Здесь необходимо следить за симметричностью амплитуды токов, протекающих через «внешние» ( $VT_3, VT_5, VT_6$  и  $VT_4$ ) и «внутренние» ( $VT_7, VT_1, VT_8$  и  $VT_2$ ) транзисторы [14].

**Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с уменьшенным числом ключей**

Вариант 1

Авторами работы [15] была предложена новая топология МУ АИТ с уменьшенным числом силовых ключей. Данная топология уже содержит  $n+3$  силовых ключей и  $n-1$  токоразделяющих индуктивностей для формирования  $n$  уровней выходного тока.

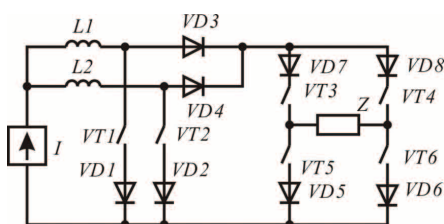


Рис. 2. Трехуровневый АИТ с уменьшенным числом силовых ключей (вариант 1)

Fig. 2. Three-level CSC with reduced number of power transistors (version 1)

Например, схема трехуровневого АИТ (рис. 2) будет содержать 6 силовых ключей и 2 токоразделяющие индуктивности, а схема четырехуровневого АИТ – 7 ключей и 3 индуктивности. Очевидна выгода в сравнении с базовой топологией.

К преимуществам данной топологии можно отнести следующее:

- 1) минимальное число силовых ключей на дополнительный уровень выходного тока;
- 2) при должном алгоритме управления функцию источника постоянного тока может выполнять следующая цепочка (DC-DC понижающий преобразователь со стабилизацией выходного тока):  $L_1VT_1VD_1VD_3$  для первого канала и соответственно  $L_2VT_2VD_2VD_4$  для второго канала. Это обстоятельство позволяет подключать преобразователь напрямую к источнику постоянного напряжения без каких-либо дополнительных устройств и элементов (в настоящей статье рассмотрено не будет).

Самым простым в реализации алгоритмом управления для данной схемы будет следующее сочетание:

- транзисторы выходного моста задают полярность тока, протекающего в нагрузке (частота коммутации равна полупериоду частоты тока в нагрузке);
- входные транзисторы, диоды и дроссели формируют ШИМ кривую каждого полупериода тока нагрузки (частота коммутации соответствует частоте опорного сигнала). Но в этом случае схема корректно работает только на активную нагрузку [15, 16].

Вариант 2

В работе [16] была предложена другая топология однофазного МУ АИТ с уменьшенным числом силовых ключей. Схема трехуровневого АИТ приведена на рис. 3. Данная топология аналогична классической (рис. 1, б), если две мостовые схемы объединить катодными группами ( $VT_3VD_3$  и  $VT_1VD_1, VT_2VD_2$  и  $VT_4VD_4$ ) и исключить параллельные элементы. Это приводит к усложнению алгоритма управления, но снижает количество силовых ключей.

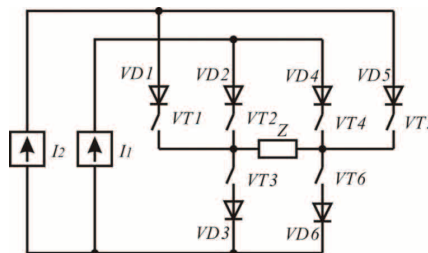


Рис. 3. Трехуровневый АИТ с уменьшенным числом силовых ключей (вариант 2)

Fig. 3. Three-level CSC with reduced number of power transistors (version 2)

Данная топология содержит  $2n$  силовых ключей и  $n-1$  источников постоянного тока для формирования  $n$  уровней выходного тока. Например, схема трехуровневого АИТ будет содержать 6 силовых ключей и 2 источника тока, а схема четырехуровневого АИТ – 8 силовых ключей и 3 источника тока. Очевидна выгода (по количеству силовых элементов) в сравнении с классической топологией.

В качестве алгоритма управления для данной топологии можно использовать СШИМ с модифицированными импульсами управления [16].

В отличие от предыдущей топологии здесь нагрузка может быть любой.

К преимуществам данной топологии можно отнести следующее:

- 1) уменьшенное число ключей на дополнительный уровень выходного тока;
- 2) простота в построении алгоритма управления (скалярная СШИМ);
- 3) корректная работа на нагрузку любого характера.

Следует упомянуть о возможности анализа данной схемы на основании принципа дуальности инверторов тока и напряжения. В монографии [17] приведена топология многоуровневого однофазно-

го автономного инвертора напряжения (рис. 4), которая подходит для подобного анализа совместно с описанной выше топологией МУ АИТ.

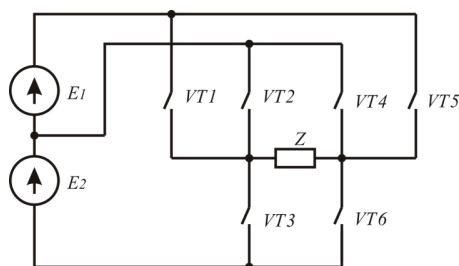


Рис. 4. Топология однофазного многоуровневого инвертора напряжения

Fig. 4. Topology of one-phase multi-level voltage inverter

**Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с неизолированными ключами**

На рис. 5, а приведена топология двухуровневого АИТ [18]. Все силовые ключи ( $Q_1-Q_4$ ) подсоединены эмиттерами в общую точку. Это существенно упрощает создание и подключение управляющей системы, нет необходимости изолировать драйверы ключей один от другого в одной стойке.

На рис. 5, б приведена базовая топология двухуровневой ячейки АИТ, ключи которой ( $Q_5, Q_6$ ) также эмиттерами подключены к одной точке.

Авторами работы [19] предложена новая схема МУ АИТ. Она формируется посредством соединения основной схемы двухуровневого АИТ с одной или несколькими ячейками АИТ, создающими 2 уровня выходного тока. Эти блоки развязаны диодами, как показано на рис. 6.

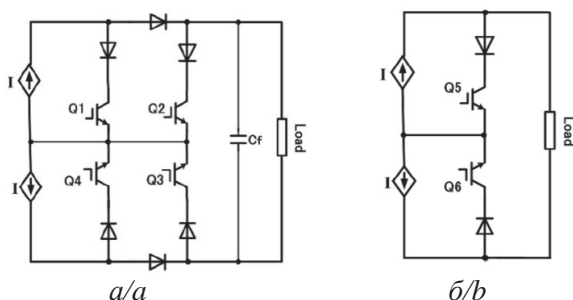


Рис. 5. Основная схема двухуровневого однофазного АИТ с неизолированными ключами (а) и базовая топология двухуровневой ячейки (б)

Fig. 5. Basic circuit of two-level one-phase CSC with non-insulated keys (a) and base topology of two-level cell (b)

Уникальной данную топологию делает следующий момент: силовые ключи соединяются эмиттерами в общей точке. Зависимость между числом уровней выходного тока АИТ и количеством ячеек, создающих два уровня тока, может быть записана следующим образом:

$$M=3+2n,$$

где  $M$  – число уровней выходного тока,  $n$  – количество двухуровневых ячеек.

Главным недостатком данной топологии является удвоенное число источников тока в сравнении с классической топологией однофазного МУ АИТ, принятой за таковую в данном обзоре (п. 1), т. е. для увеличения уровней выходного тока с 3 до 5 необходимо использовать 6 источников тока против 3 для классической топологии.

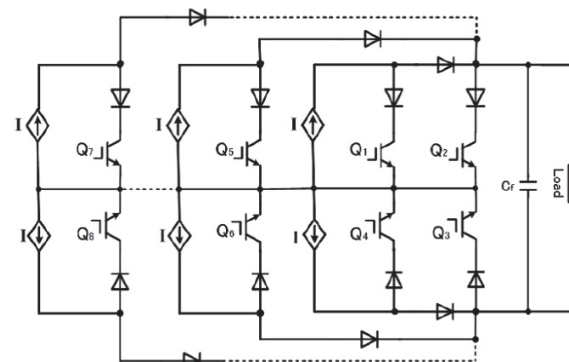


Рис. 6. Обобщенная топология n-уровневого однофазного АИТ с неизолированными ключами

Fig. 6. Generalized topology of n-level one-phase CSC with non-insulated keys

В качестве алгоритма управления можно использовать СШИМ со многими опорными сигналами: каждый опорный сигнал для своей двухуровневой ячейки.

**Многоуровневый трехфазный автономный инвертор тока. Базовая топология**

Напомним, что в качестве классической топологии для однофазных многоуровневых АИТ была выбрана схема, включающая две однофазные мостовые ячейки АИТ, работающие параллельно на общую нагрузку. Ее можно распространить и на трехфазный вариант, и в итоге получить классическую схему многоуровневого трехфазного АИТ [20], которая представлена на рис. 7.

В качестве алгоритма управления для (например) трехуровневого трехфазного АИТ (две трехфазные мостовые схемы) целесообразно выбрать пространственную векторную ШИМ (SVPWM), опорные сигналы для двух схем должны быть сдвинуты на  $180^\circ$  для достижения пятиуровневого тока в нагрузке [21].

СШИМ в классическом варианте для данной схемы неприменима. Необходимо выполнить несложные манипуляции с импульсами управления для того, чтобы они могли корректно управлять ключами схемы для получения ШИМ тока [13].

**Топологии многоуровневого автономного инвертора тока, основанные на принципе дуальности**

Доказано, что принцип дуальности – полезный инструмент в силовой электронике [11]. Дуальное преобразование может быть применено как для «плоских» силовых схем [22], т. е. для тех, которые могут быть нарисованы без пересечения проводников друг относительно друга, за исключени-

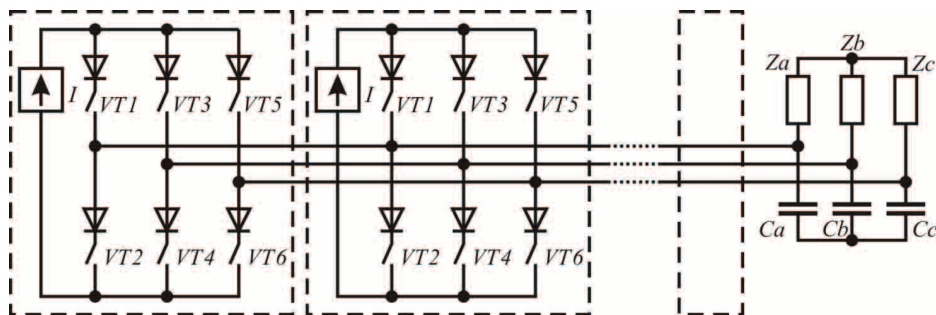


Рис. 7. Схема многоуровневого трехфазного АИТ (классическая топология)

Fig. 7. Circuit of multilevel three-phase CSC (classical topology)

ем мест соединений, так и для таких силовых схем, которые не могут быть преобразованы к плоскому виду [23]. В настоящем обзоре будет рассмотрен только первый случай, как наиболее простой.

Для того чтобы осуществить синтез схемы многоуровневого инвертора тока, используя известные знания о многоуровневом инверторе напряжения, необходимо определить оригинальные топологии трехфазного инвертора напряжения, представить их в плоском виде, а затем использовать теорию дуальности.

Ниже представлены два метода преобразования топологии к плоскому виду инвертора напряжения в плоском виде.

1. Метод, основанный на добавлении дополнительной стойки [22].

Из общепринятой топологии трехфазного шести-ключевого двухуровневого инвертора напряжения посредством добавления дополнительной стойки (ключ  $S_1^*$  последовательно с ключом  $S_4^*$ ) и установления, что ключи  $S_1$  и  $S_1^*$ ,  $S_4$  и  $S_4^*$  управляются одинаково, следует топология нового трехфазного двухуровневого инвертора напряжения в плоском виде, как показано на рис. 8, а. Следовательно, дуальное преобразование может быть непосредственно применено к получившейся схеме. На рис. 8, б приведена соответствующая схема инвертора тока.

2. Метод, основанный на добавлении дополнительного источника энергии [22].

Другой способ для получения схемы в плоском виде из традиционной топологии трехфазного шести-ключевого двухуровневого инвертора напряжения возможен посредством добавления дополнительного источника напряжения  $V_{dc2}$  в третью стойку (ключ  $S_5$  включен последовательно с  $S_2$ ). Модифицированная топология инвертора напряжения в плоском виде приведена на рис. 9, а. Аналогично легко получить соответствующую ей дуальную топологию посредством использования дуального преобразования. На рис. 9, б приведена дуальная схема двухуровневого инвертора тока.

Применяя два метода для построения плоской схемы, которые описаны выше, эквивалентная схема трехфазного инвертора напряжения в плоском виде может быть получена из традиционной топологии трехфазного шестиключевого двухуровневого инвертора напряжения. Это позволяет напрямую применить для инверторов тока все изобилие существующих знаний о законах модуляции для инверторов напряжения. Однако, с точки зрения практичности, способ подсоединения трехфазной нагрузки в дуальной схеме на рис. 8, б встречается очень редко в сравнении со схемой на рис. 9, б. Следовательно, метод, основанный на добавлении дополнительного источника электрической энергии

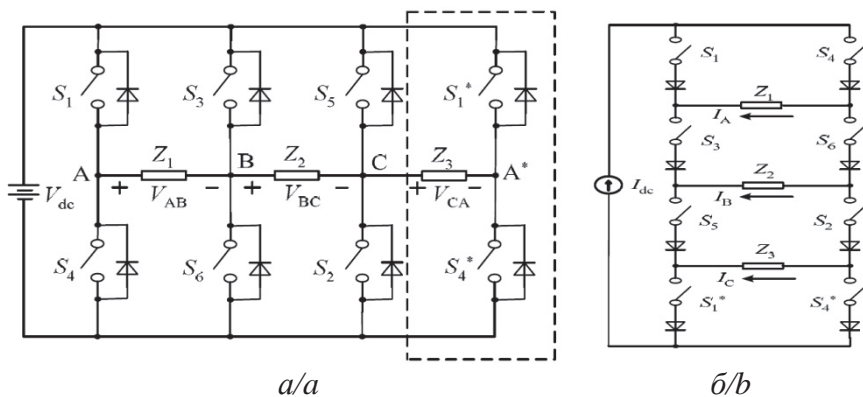


Рис. 8. Двухуровневый инвертор напряжения (а) с четырьмя стойками и двухуровневый инвертор тока (дуальная схема, б)

Fig. 8. Two-level voltage inverter (a) with four props and two-level current inverter (dual circuit, b)

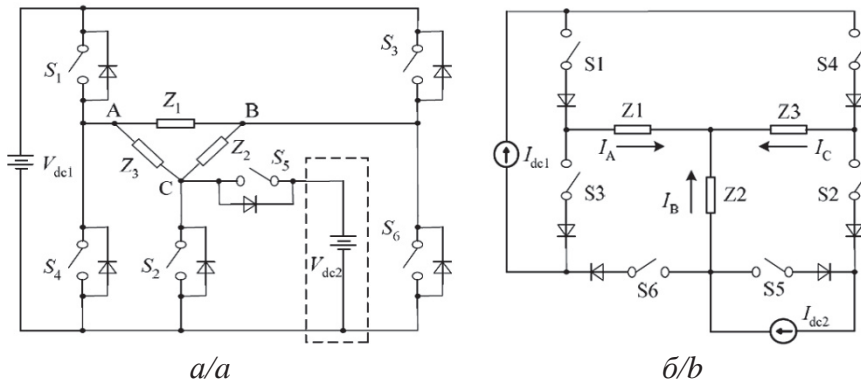


Рис. 9. Двухуровневый инвертор напряжения с двумя источниками напряжения (а), дуальная схема инвертора тока (б)

Fig. 9. Two-level voltage inverter with two voltage sources (a), dual circuit of current inverter (b)

гии, более привлекательный и его можно модифицировать, чтобы применять к трехфазным многоуровневым инверторам напряжения [22].

Для каскадного многоуровневого автономного инвертора напряжения (МУ АИН) на Н-мостах и МУ АИН с фиксирующими диодами, в силу особенностей структуры их схемы, очень сложно получить эквивалентную топологию, используя дополнительную стойку или источник электрической энергии. Однако для схемы МУ АИН с плавающими конденсаторами, посредством добавления источника напряжения в третью стойку, можно получить трехфазную эквивалентную схему в плоском виде. На рис. 10 приведена усовершенствованная схема трехуровневого инвертора напряжения с плавающими конденсаторами в плоском виде [22]. Дуальное преобразование может быть напрямую применено к данной схеме. На рис. 11 приведена соответствующая дуальная схема трехфазного трехуровневого инвертора тока.

В данной схеме ключи двухсторонней проводимости преобразованы в ключи односторонней про-

водимости. В соответствии с принципом дуальности в каждой фазе имеются две пары дополнительных ключей –  $(S_{x2}, S_{x3}), (S_{x1}, S_{x4}), (x=a,b,c)$ . Источник постоянного тока  $2I_{dc}$  поровну делится разделятельными индуктивностями  $L_y (y=a,b,c)$  так, что ток через каждую индуктивность равен  $I_{dc}$ . К тому же соединения в схеме в каждой фазе подобны соединениям в однофазном трехуровневом инверторе тока [12].

#### Однофазный многоуровневый автономный инвертор тока с автоматически регулируемым током

Несмотря на все особенности топологий многоуровневых АИТ, общим спорным вопросом для этих инверторов является следующее: как эффективно управлять амплитудой промежуточного уровня постоянного тока (токи через токоразделяющие индуктивности) [14]. Без контроля баланса ток не может оставаться на постоянном уровне. Подобная проблема существует для промежуточного уровня постоянного напряжения в трехуровневом инверторе напряжения с фиксированной ну-

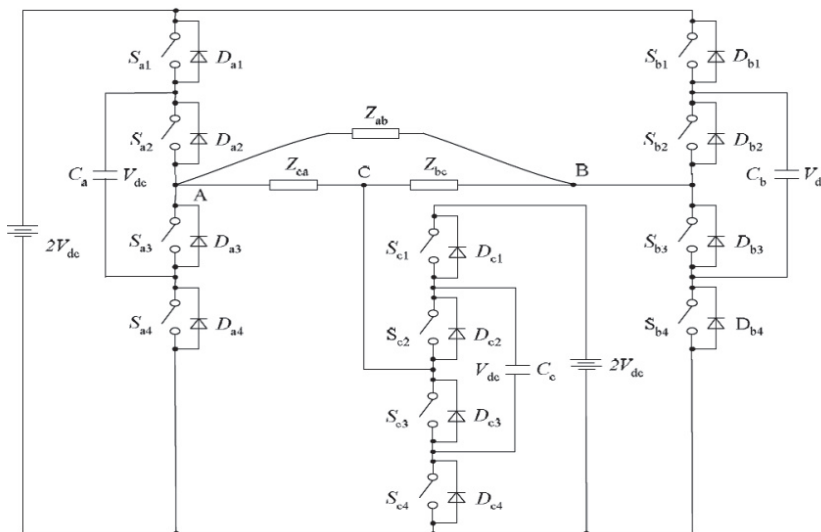


Рис. 10. Усовершенствованная схема трехуровневого инвертора напряжения с плавающими конденсаторами (в плоском виде)

Fig. 10. The advanced circuit of three-level voltage inverter with floating capacitors (flat form)

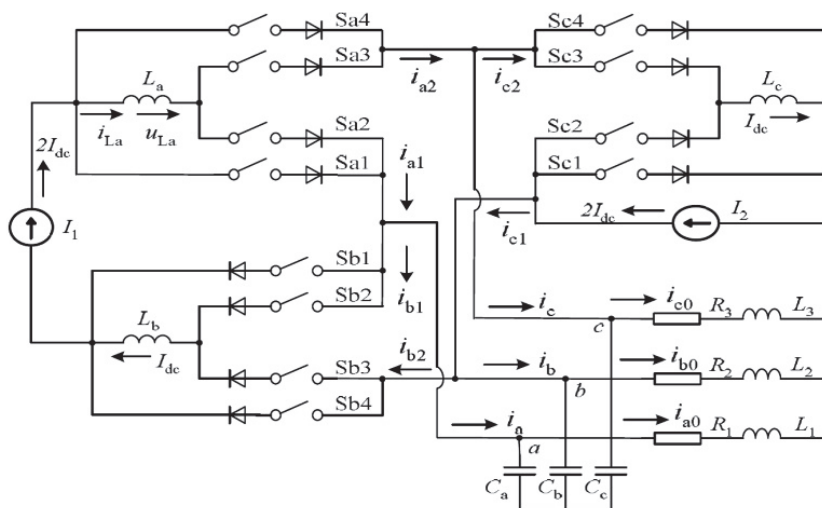


Рис. 11. Трехфазный трехуровневый инвертор тока (дуальная схема)

Fig. 11. Three-phase three-level current inverter (dual circuit)

левой точкой (NPC), если не введено алгоритмов компенсации.

На рис. 12, а приведена обобщенная схема однофазного трехуровневого АИН в плоском виде, поэтому дуальное преобразование может быть применено к данной схеме. Соответствующая дуальная структура, называемая обобщенной структурой однофазного трехуровневого АИТ, приведена на рис. 12, б. Здесь ключи и параллельные диоды преобразуются в ключи с последовательным диодом – ключи односторонней проводимости. Разде-

лительные индуктивности, выступающие в качестве источников тока, являются дуальным аналогом фиксирующих конденсаторов.

Для достижения характерной формы многоуровневого тока на выходе инвертора токи, протекающие через все разделительные индуктивности, должны быть выровнены. В обобщенном МУ АИН все уровни напряжений должны быть выровнены благодаря фиксирующим ключам и диодам. Согласно дуальности, в обобщенном МУ АИТ все уровни токов должны быть выровнены благодаря

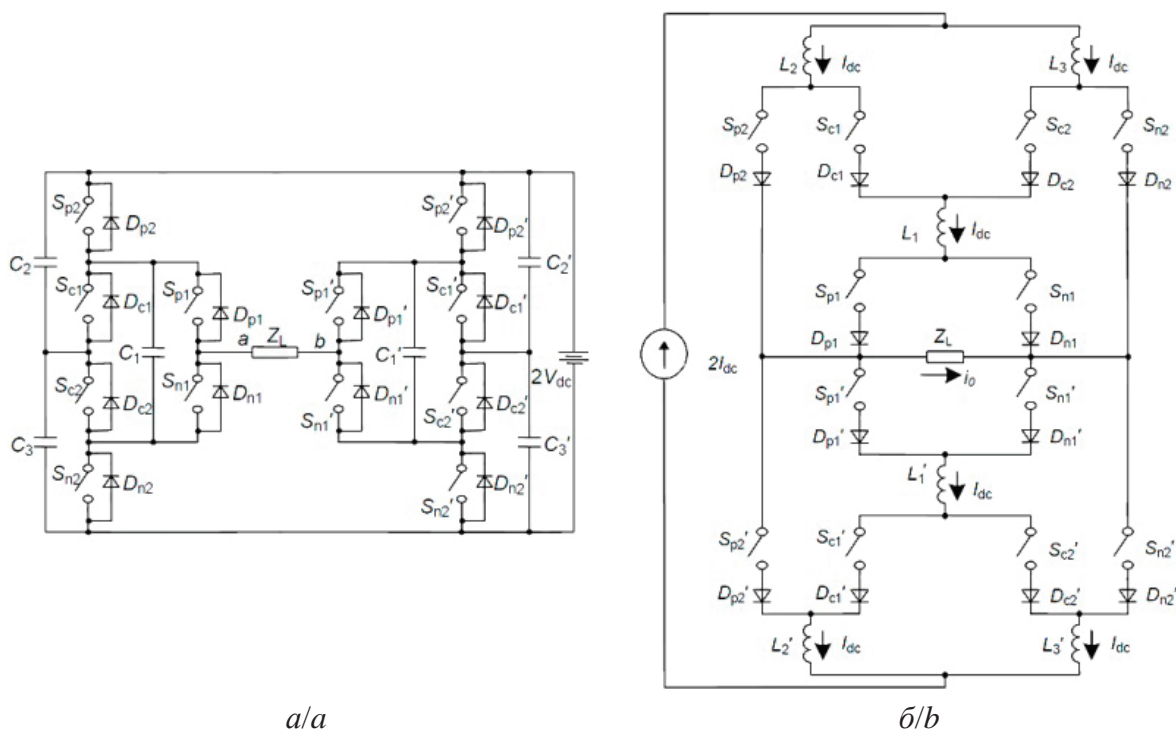


Рис. 12. Обобщенная топология однофазного трехуровневого инвертора напряжения (а) и инвертора тока (б)

Fig. 12. Generalized topology of one-phase three-level voltage inverter (a) and current inverter (b)

токоразделительным переключениям, т. е. используя избыточные состояния. Следовательно, механизм выравнивания токов в индуктивностях подобен выравниванию напряжений на конденсаторах в инверторе напряжения [14].

**Трехуровневый автономный инвертор тока на базе однофазных топологий**

В работе [24] представлена обобщенная топология  $n$ -уровневого АИТ и проведен анализ на примере восьми-ключевого трехуровневого АИТ. На основе этой топологии авторы работы [25] предложили топологию шести-ключевого однофазного трехуровневого АИТ, которая приведена на рис. 13.

К преимуществам данного подхода стоит отнести существенное упрощение схемотехники источника тока. В некоторых случаях, например для высокоомощных областей применения, это очень важный момент. На основе топологии шести-ключевого однофазного трехуровневого АИТ могут быть созданы два вида топологи трехфазного трехуровневого АИТ: с нулевым проводом (соединение нагрузки звезда с нулем – рис. 14, а) и без нулевого провода (рис. 14, б) [26].

Наиболее подходящим алгоритмом управления для каждой однофазной трехуровневой ячейки является метод *POD-PWM* (*Phase opposition disposition PWM* – ШИМ с противофазным положением опорных сигналов – выше и ниже нуля) [27]. Рис. 15 поясняет процесс формирования импульсов управления для одной фазы: модулирующий сигнал  $W_m$  сравнивается с 4-мя опорными сигналами  $WC_1$ – $WC_4$ .

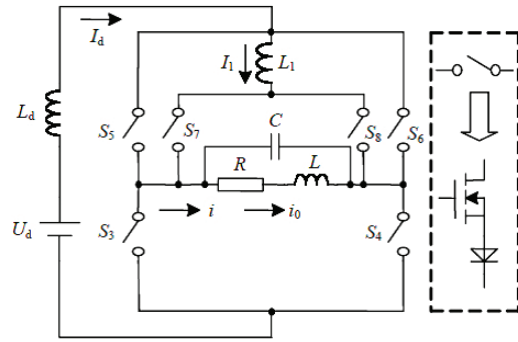


Рис. 13. Шести-ключевой однофазный трехуровневый АИТ

Fig. 13. Six-keys one-phase three-level CSC

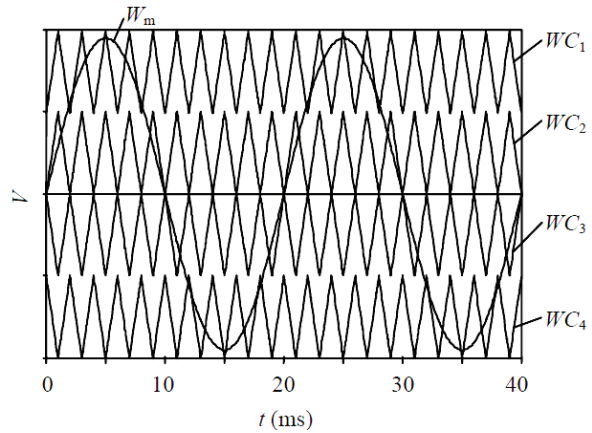


Рис. 15. Пояснения к методу POD-PWM

Fig. 15. Explanation to the method POD-PWM

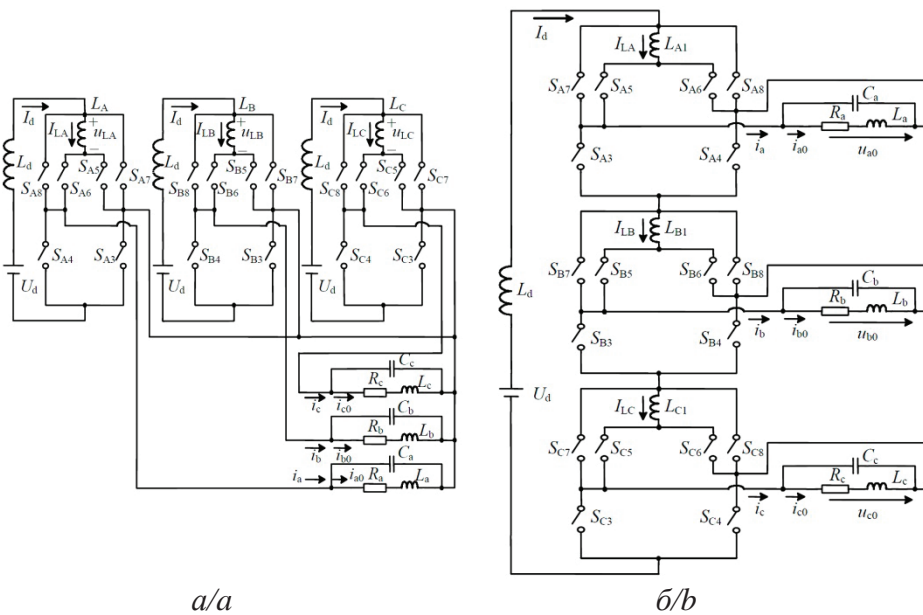


Рис. 14. Силовая схема трехфазного трехуровневого АИТ (разделение по типу соединения обмоток асинхронного двигателя): звезда с нулем (а) и электрически несвязанные фазные обмотки (б)

Fig. 14. Power circuit of three-phase three-level CSC (induction motor winding connection separation): star with zero (a) and electrically uncoupled phase windings (b)

Как было упомянуто выше, в качестве источников тока служит источник ЭДС и развязывающие дроссели (количество зависит от схемы включения (рис. 14)). Поэтому при работе преобразователя будет наблюдаться несимметрия токов в дросселях. Данный негативный эффект в большинстве случаев решается незначительным усложнением алгоритма управления, который использует избыточные состояния многоуровневого АИТ для выравнивания токов в дросселях [14].

#### Квази-многоуровневые топологии

В отечественной литературе под «уровнями преобразователя» понимается число уровней тока в звене постоянного тока [17]. В то же время можно ввести понятие «число уровней тока (напряжения) в нагрузке». Второе понятие, согласно классическим представлениям, должно вытекать из первого. Но это не всегда происходит. В современной промышленности существуют запатентованные топологии МУ АИТ, которые при наличии одного уровня тока в звене постоянного тока могут формировать три (классический случай) и более уровней тока (напряжения) в нагрузке. Такие топологии относятся к классу квази-многоуровневые топологии.

Многозонный инвертор тока (рис. 16) [28] является одним из примеров такого класса схем. В данной схеме применяются переключения внешнего емкостного импеданса нагрузки для получения разных уровней напряжения на коммутируемой нагрузке [29]. Несомненным преимуществом данной топологии является отсутствие дополнительных источников постоянного тока на входе инвертора.

Для управления данным преобразователем применялся метод ШИМ [29].

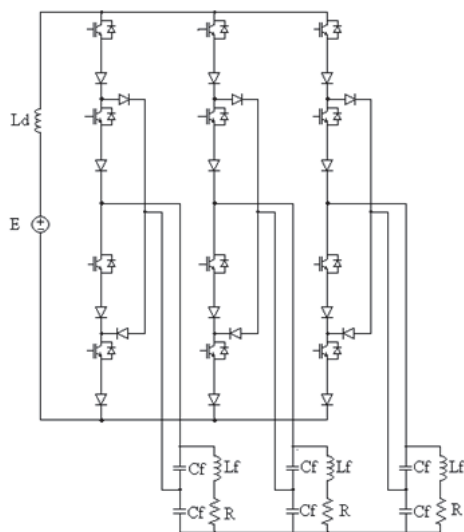


Рис. 16. Схема трехуровневого многозонного инвертора тока

Fig. 16. Circuit of three-level multizone current inverter

#### Классификация многоуровневого автономного инвертора тока

По результатам проведенной работы целесообразно систематизировать полученные данные и сформировать классификацию топологий МУ АИТ. Авторы настоящего обзора попытались проделать данную работу, результат которой приведен на рис. 16. Очевидно, возможны и другие классификации, основанные, в частности, на показателях энергоэффективности многоуровневых АИТ [30].

Все МУ АИТ удобно разделить по числу фаз формируемого тока. Это однофазные и трехфазные топологии. Последние также делятся на трехпроводные и четырехпроводные линии. Между топологиями для 3- и 4-проводных линий имеется кардинальное отличие – возможность формировать несимметричный трехфазный ток, как по амплитуде, так и по сдвигу фаз. Это порождает некоторое усложнение схемотехники данных топологий (особенно для многоуровневых вариантов) и значительное усложнение алгоритмов управления. Но данная тема выходит за рамки настоящего обзора.

Однофазные МУ АИТ можно разделить на топологии, полученные путем параллельного соединения однофазных 2-уровневых ячеек (из которых можно получить топологию с уменьшенным числом силовых ключей, относительно базовой) и путем применения принципов дуальности к однофазным МУ АИТ.

Трехфазные топологии для 3-проводной линии можно разделить следующим образом:

- топологии, полученные путем каскадного соединения 1-фазных МУ АИТ, формируемых кривые выходного тока с требуемым сдвигом по фазе. В результате можно получить топологии для схем соединения нагрузки звезда без нуля и треугольник;
- топологии, полученные по результатам применения принципов дуальности к 3-фазным МУ АИТ;
- топологии, полученные путем параллельного соединения 3-фазных 2-уровневых АИТ.

#### Заключение

В результате проведенного исследования было выполнено следующее:

- проведен обзор наиболее известных однофазных и трехфазных топологий многоуровневых АИТ применительно к ветроэнергетическим станциям. В том числе приведены топологии, полученные в результате использования принципов дуальности автономных инверторов тока и напряжения;
- для некоторых топологий приведен сравнительный анализ по числу дополнительных ключей и источников тока на каждый новый уровень выходного тока преобразователя, простоты создания (использования) алгоритма управления и корректности работы;
- предложена классификация топологий МУ-АИТ.

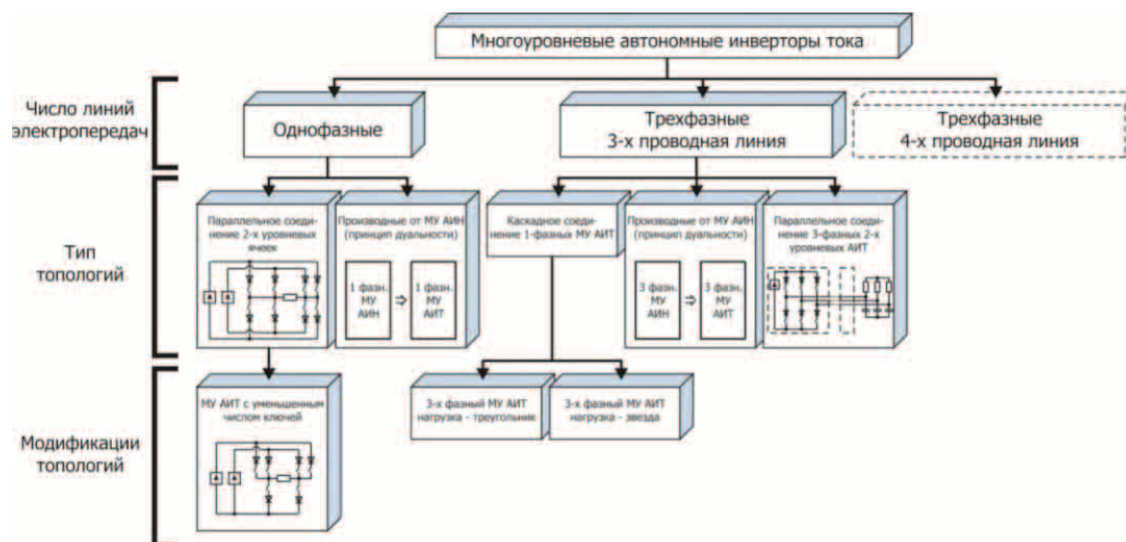


Рис. 17. Классификация МУ АИТ

Fig. 17. Classification of multilevel CSC

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрайбер Д. Преобразователи высокой мощности для возобновляемых источников энергии // Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 90–94.
2. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силовая электроника. – 2007. – № 2. – С. 53–59.
3. Кумаков Ю.А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. – 2005. – № 5. – С. 11–16.
4. Дервяшкин А.В. Техничко-экономическое сопоставление преобразователей частоты с автономным инвертором тока и автономным инвертором напряжения // Интеллект и наука: Труды XII Междунар. науч. конф. – Железногорск, 2012. – С. 198–199.
5. Клевцов А.В. Преобразователи частоты для электропривода переменного тока. – Тула: Гриф и К°, 2008. – 224 с.
6. Zinoviev G.S., Lopatkin N.N. Evolution of multilevel voltage source inverters // On actual problems of electronic instrument engineering. АРЕИЕ-08. – Novosibirsk, 2008. – V. 1. – P. 125–136.
7. Зиновьев Г.С. Итоги решения проблем электромагнитной совместимости вентиляльных преобразователей // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 12–16.
8. Dash P.P. A high-performance three-phase grid-connected PV system based on multilevel current source inverter // A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Canada, 2013. – 140 p.
9. Modeling of a three phase SPWM multilevel VSI with low THD using Matlab/Simulink / I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir, G. Bal // 13<sup>th</sup> European Conference IEEE Power Electronics and Applications EPE'09. – Barcelona, Spain, 2009. – P. 1–10.
10. Karuppanan P., Makapatra K.K. FPGA based single-phase cascaded multilevel voltage source inverter FED ASD application // Journal of Electrical Engineering. – 2011. – V. 11. – P. 102–106.
11. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle / J. Bao, W. Bao, S. Wang, Z. Zhang // Applied power electronics conference and exposition APEC. – Palm Springs, 2010. – P. 1097–1100.
12. Antunes F.L.M., Brada H.A.C., Barbi I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters // IEEE Transactions of industrial electronics. – 1999. – V. 46. – № 1. – P. 31–38.
13. Aguirre M.P., Calvino L., Valla M.I. Multilevel current-source inverter with FPGA control // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2013. – V. 60. – № 1. – P. 3–10.
14. Bao J., Bao W., Zhang Z. Generalized multilevel current source inverter topology with self-balancing current // Journal of Zhejiang University-Science. – 2010. – V. 11. – P. 555–561.
15. Hosseini S.H., Kangarlu M.F., Sadigh A.K. A new topology for multilevel current source inverter with reduced number of switches // International conference on electrical and electronics engineering. – Bursa, Turkey, 2009. – P. 273–277.
16. A different multilevel current-source inverter / N. Vazquez, H. Lopez, C. Hernandez, E. Vazquez, R. Osorio, J. Arau // IEEE Transactions of industrial electronics. – 2010. – V. 57. – № 8. – P. 2623–2632.
17. Тонкаль В.Е. Синтез автономных инверторов модуляционного типа. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 207 с.
18. Noguchi S., Noguchi T. Three-level current-source PWM inverter with no-isolated switching devices for photovoltaic conditioner // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – Cambridge, United Kingdom, 2008. – P. 2580–2585.
19. Noguchi S., Noguchi T. New generalized multilevel current-source PWM inverter with no-isolated switching devices // International conference on power electronics and drive systems. – Taipei, Taiwan, 2009. – P. 314–318.
20. Pulse wide modulated buck-boost five-level current source inverters / F. Gao, P.C. Loh, F. Blaabjerg, D.M. Vilathgamuwa // Applied power electronics conference and exposition. – Lima, Peru, 2008. – P. 469–475.
21. Шрейнер П.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
22. Freeland S.D. Techniques for the practical application of duality to power circuits // IEEE Transactions on power electronics. – 1992. – V. 7. – № 2. – P. 374–384.
23. Wolf P.J., Ledwich G.F., Kwong K.C. The Application of the Duality Principles to Nonplanar Circuits // IEEE Transactions on power electronics. – 1993. – V. 8. – № 2. – P. 104–111.



24. A new three-phase 5-level current-source inverter / J. Bao, Z. Bai, Q. Wang, Z. Zhang // Journal of Zhejiang University-Science. – 2006. – V. 7. – P. 1973–1978.
25. A New Single-phase Multilevel Current-source Inverter / Y. Xiong, D.J. Chen, S.Q. Deng, Z.C. Zhang // IEEE. APEC2004. – Santiago, Chile, 2004. – P. 1682–1685.
26. A New Three-phase Five-level Current-source Inverter / Y. Xiong, Y.L. Li, X. Yang, K. Wei, Z.C. Zhang // IEEE. APEC2005. – Busan, South Korea, 2005. – P. 424–427.
27. McGrath B.P., Holmes D.G. Multilevel PWM strategies for multilevel inverters // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2002. – V. 49. – № 4. – P. 858–867.
28. Многозонный преобразователь постоянного тока в переменный: пат. Российская Федерация 2523001, МПК H02M7/217, заявл. 19.11.2012; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 7 с.
29. Волков А.Г., Зиновьев Г.С. Анализ электромагнитных процессов в трехфазном многозонном инверторе тока // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 1 (54). – С. 134–142.
30. Зиновьев Г.С. Расширение набора показателей энергоэффективности устройств силовой электроники // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 54–58.

Поступила 20.03.2015 г.

UDC 621.314.26

## REVIEW OF MULTILEVEL CURRENT SOURCE INVERTERS OF WIND POWER STATIONS

**Aleksey I. Malnev,**

Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: malnev54@yandex.ru

**Igor A. Bakhovtsev,**

Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: igor\_55@ngs.ru

**Gennady S. Zinoviev,**

Novosibirsk State Technical University, 20, prospect Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: genstep@mail.ru

*The review deals with single and three-phase multilevel current source inverters for wind power stations. The review is mainly based on the foreign press. The introduction gives brief justification of significance of using multilevel inverters in wind power stations and comparison of autonomous voltage and current inverters. The accomplishments of current source inverter and its use have been listed. The single-phase versions are considered further. This type of converters is characterized by noncomplex topology (as a rule) and easy studying of forming levels of output current. The base topology is determined for them. For some topologies in comparison with the base one the comparative characteristics are considered for a number of power switches and control systems. Special attention is given to topologies with reduced number of power switches. In addition, the focus is on single-phase multilevel current source inverters, based on no-isolated switches. The features of their management, strengths and weaknesses are considered. The base topology is determined for three-phase multilevel current source inverters. Two three-phase circuit transfer methods using duality principles of current source and voltage source inverters are described. Then some topologies, which had been derived using these principles, are described as well. The paper refers to the problem of the current balance in some cascades of multilevel current source inverters and to the methods of its implementation. This problem is similar to the problem of voltage balance in the multilevel voltage source inverters. The three-phase topologies, which had been acquired from several one-phase cells, are described. It is important for high powerful converters. The paper considers a new class of multilevel current source inverters topologies, which is named a quasi-multi-zone topology. The authors describe its characteristics and advantages. For each topology, described in the paper, the brief descriptions of control algorithms is given. At the end of the article by the results of the prepared review the authors propose the classification of different topologies of multilevel current source inverters by several criteria.*

### Key words:

*Wind power station, current source inverter, multilevel current source converter, control system, control method, duality principle, quasi-multi-zone topologies, current source inverter classification.*

### REFERENCES

1. Shrayber D. Preobrazovateli vysokoy moshchnosti dlya vozobnovlyaemykh istochnikov energii [A high-power converters for renewable energy]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2010, no. 5, pp. 90–94.
2. Kolpakov A. Skhemotekhnika moshchnykh vysokovolnykh preobrazovateley [A high-power converter circuitry]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2007, no. 2, pp. 53–59.
3. Kumakov Yu.A. Invertory napryazheniya so stupenchatoy modulyatsiyey i aktivnaya filtratsiya vysshikh garmonik [Voltage inverters with step-modulation and active filtering of high order harmonics]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 5, pp. 11–16.
4. Derevyashkin A.V. Tekhniko-ekonomicheskoe sopostavlenie preobrazovateley chastoty s avtonomnym invertorom toka i avtonomnym invertorom napryazheniya [Technological and economic comparison of converters with current source inverter and voltage source inverter]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Intellekt i nauka* [Intelligence and science. Proc. of XII International scientific conference]. Zheleznogorsk, 2012. pp. 198–199.
5. Klevtsov A.V. *Preobrazovateli chastoty dlya elektroprivoda peregennogo toka* [Converters for AC electric drive]. Tula, Grif i K<sup>o</sup> Publ., 2008. 224 p.
6. Zinoviev G.S., Lopatkin N.N. Evolution of multilevel voltage source inverters. *On actual problems of electronic instrument engineering*. Novosibirsk, 2008. Vol. 1, pp. 125–136.
7. Zinoviev G.S. Itogi reshenia problem elektromagnitnoy sovmestimosti ventilynykh preobrazovateley [The results of solving the

- problems of electromagnetic compatibility of electronic power converters]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2000, no. 11, pp. 12–16.
8. Dash P.P. *A high-performance three-phase grid-connected PV system based on multilevel current source inverter. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering*. Waterloo, Canada, 2013. 140 p.
  9. Colak I., Kabalci E., Bayindir R., Bal G. Modeling of a three phase SPWM multilevel VSI with low THD using Matlab/Simulink. *13<sup>th</sup> European Conference IEEE Power electronics and applications EPE'09*. Barcelona, Spain, 2009. pp. 1–10.
  10. Karuppanan P., Makapatra K.K. FPGA based single-phase cascaded multilevel voltage source inverter FED ASD application. *Journal of electrical engineering*, 2011, vol. 11, pp. 102–106.
  11. Bao J., Bao W., Wang S., Zhang Z. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle. *Applied power electronics conference and exposition*. Palm Springs, 2010. pp. 1097–1100.
  12. Antunes F.L.M., Brada H.A.C., Barbi I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 1999, vol. 46, no. 1, pp. 31–38.
  13. Aguirre M.P., Calvino L., Valla M.I. Multilevel current-source inverter with FPGA control. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 3–10.
  14. Bao J., Bao W., Zhang Z. Generalized multilevel current source inverter topology with self-balancing current. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2010, no. 11, pp. 555–561.
  15. Hosseini S.H., Kangarlu M.F., Sadigh A.K. A new topology for multilevel current source inverter with reduced number of switches. *International conference on electrical and electronics engineering*. Bursa, Turkey, 2009. pp. 273–277.
  16. Vazquez N., Lopez H., Hernandez C., Vazquez E., Osorio R., Arau J. A different multilevel current-source inverter. *IEEE Transactions of industrial electronics*, 2010, vol. 57, no. 8, pp. 2623–2632.
  17. Tonkal V.E. *Sintez avtonomnykh inverterov modulyatsionnogo tipa* [Synthesis of stand-alone inverters of modulation type]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 207 p.
  18. Noguchi S., Noguchi T. Three-level current-source PWM inverter with no-isolated switching devices for photovoltaic conditioner. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, United Kingdom. 2008. pp. 2580–2585.
  19. Noguchi S., Noguchi T. New generalized multilevel current-source PWM inverter with no-isolated switching devices. *International conference on power electronics and drive systems*. Taipei, Taiwan, 2009. pp. 314–319.
  20. Gao F., Loh P.C., Blaabjerg F., Vilathgamuwa D.M. Pulse wide modulated buck-boost five-level current source inverters. *Applied power electronics conference and exposition*. Lima, Peru, 2008. pp. 469–475.
  21. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s polu-provodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid-state frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Press, 2000. 654 p.
  22. Freeland S.D. Techniques for the practical application of duality to power circuits. *IEEE Transactions on power electronics*, 1992, vol. 7, no. 2, pp. 374–384.
  23. Wolf P.J., Ledwich G.F., Kwong K.C. The Application of the Duality Principles to Nonplanar Circuits. *IEEE Transactions on power electronics*, 1993, vol. 8, no. 2, pp. 104–111.
  24. Bao J., Bai Z., Q. Wang Q., Zhang Z. A new three-phase 5-level current-source inverter. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2006, vol. 7, pp. 1973–1978.
  25. Xiong Y., Chen D.J., Deng S.Q., Zhang Z.C. A new single-phase multilevel current-source inverter. *IEEE*. Santiago, Chile, 2004. pp. 1682–1685.
  26. Xiong Y., Li Y.L., Yang X., Wei K., Zhang Z.C. A new three-phase five-level current-source inverter. *IEEE*. Busan, South Korea, 2005. pp. 424–427.
  27. McGrath B.P., Holmes D.G. Multilevel PWM strategies for multilevel inverters. *IEEE. Trans. on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 858–867.
  28. Volkov A.G., Zinoviev G.S. *Multi-zone dc-to-ac converter*. RF patent, no. 2523001, 2012.
  29. Volkov A.G., Zinoviev G.S. Analiz elektromagnitnykh protsessov v trekhfaznom mnogozonnom invertore toka [Analysis of electromagnetic processes in a three-phase multi-zone current source inverter]. *Nauchny vestnik NGTU – Scientific Bulletin of NSTU*, 2014, no. 1 (54), pp. 134–142.
  30. Zinoviev G.S. Rasshirenie nabora pokazateley energoeffektivnosti ustroystv silovoy elektroniki [A wider range of performance of power electronic devices]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 54–58.

Received: 20 March 2015.

УДК 631.811.944.631.445.12

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

**Архипов Виктор Сергеевич,**

канд. хим. наук, доцент кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vsa@tpu.ru

**Бернатонис Вилис Казимирович,**

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

**Цель исследования:** изучение распределения марганца в торфяных залежах Томской области. Ранее выявлены закономерности в распределении железа, кальция и ряда микроэлементов в торфяных залежах Томской области.

**Актуальность.** Освоение торфяных ресурсов Томской области позволит наладить выпуск торфяной продукции для земледелия, медицины, энергетики. Квалифицированное использование торфов требует знания не только технологических свойств торфа, но и его минерального состава, особенно содержания биологически активных элементов, к которым относится марганец.

**Методы исследования.** В ходе исследования проводились полевые работы на торфяных болотах Томской области. Отбирали послонные пробы торфа на 8 болотах таёжной зоны Томской области. Обследовали как верховые водораздельные болота, так и низинные болота речных долин. Определение марганца в торфепроводили путем окисления ионов марганца в азотнокислом растворе персульфатом аммония в присутствии нитрата серебра. Концентрацию перманганат-ионов в растворе определяли на фотоколориметре КФК-2МПс кюветой 50 мм при длине волны 530 нм.

**Результаты.** Установлено, что содержание марганца в торфяных залежах таёжной зоны Томской области изменяется от 20...50 до 900...950 мг/кг сухого торфа. Минимальные содержания марганца обнаружены в центрах верховых водораздельных болот, а максимальные – в низинных болотах речных долин. На периферии крупных болотных систем распространены переходные и низинные залежи с содержанием марганца 200...300 мг/кг. Наиболее обогащены марганцем слои торфа с известковой минерализацией.

**Выводы.** Распределение марганца в болотных массивах и системах разной сложности подчиняется закономерностям ландшафтно-геохимических систем. Среди них выделяются геохимически сопряженные автономные и подчиненные звенья, связанные потоками миграции болотных и почвенно-грунтовых вод.

### Ключевые слова:

Торфяная залежь, марганец, распределение, накопление, миграция.

### Введение

Многие авторы относят марганец к числу микроэлементов, играющих важную роль в физиологии растений и животных [1]. Марганец в составе торфов рассматривается как один из ценных элементов для использования торфа в земледелии. Представляет интерес также содержание марганца при использовании торфа в процессах биотехнологии и энергетике.

Современное распределение марганца в торфяных залежах Томской области складывалось в течение голоцена и определялось гидрогеохимическими условиями торфонакопления. Разнообразие этих условий привело к формированию разных типов торфяных залежей с широким диапазоном содержания зольных элементов и микроэлементов.

Известны следующие источники поступления марганца и других минеральных элементов в торфяную залежь [2]:

- 1) минеральная часть растений-торфообразователей (первичная зола);
- 2) принесенные в торфяную залежь минеральные соединения с потоками водной и воздушной миграции (вторичная зола). В составе вторичной золы обычно различают кластогенную (механически задержанные частицы), сорб-

ционную золу, а также золу различных органо-минеральных соединений, образовавшихся при взаимодействии торфа с болотными водами.

Процессы торфонакопления обусловили повышенную концентрацию органического вещества (ОВ) в природных водах четвертичной водоносной толщи. Пониженный редокс-потенциал торфяных залежей и заболоченных почв вызывает изменение валентных состояний марганца, а следовательно, его свойств, путей и форм миграции. В ходе оторфовывания болотной растительности возникает большое разнообразие реакционно-способных органических соединений и на их основе органо-минеральных производных с иными химическими свойствами. Агрессивность живых растений по отношению к минеральным компонентам в силу своего резкого количественного преобладания намного выше, чем в других ландшафтах таёжной зоны. В результате возрастает подвижность элементов переменной валентностью – железа и марганца [3]. В геохимии этих элементов много общего. Образование железомарганцевых конкреций в кислой среде отражает это сродство [1]. Марганец более разнообразен по возможным соединениям по сравнению с железом. Он легко образует серию соединений различных степеней окисления от +2 до +7. В кислой среде

торфяной залежи преобладает ион  $Mn^{2+}$ . При изменении режима питания может происходить трансформация соединений марганца. Такое изменение режима питания происходит при формировании торфяной залежи олиготрофных выпуклых болот, доминирующих в южной и средней тайге Западной Сибири. В общем случае торфяной массив проходит 3 фазы развития [4, 5]:

- 1) ранняя евтрофная фаза-заполнение торфом депрессии рельефа (котловина, западина); в питании преобладали поверхностно-сточные грунтовые воды с повышенной минерализацией;
- 2) средняя мезотрофная фаза-выход торфяной залежи на уровень окружающих почвогрунтов; питание смешанного типа с близким участием атмосферных и поверхностно-сточных вод;

- 3) фаза выпуклого верхового болота с преимущественно атмосферным питанием, наиболее бедным по минеральному составу.

Соотношение между фазами развития олиготрофного болотного массива зависит от рельефа местности и гидрогеохимических условий, что приводит к большому разнообразию строения торфяных залежей. Дальнейшее разрастание локальных болотных массивов приводит к их слиянию и образованию сложных болотных систем, таких как Васюганская и Салымо-Юганская. Распределение железа, кальция и других элементов в торфяных залежах Томской области представлено в ранее проведенных работах [6–8]. В данной работе изучено распределение марганца в торфяных залежах этой территории.

**Таблица.** Характеристика изученных болот

**Table.** Characteristic of the investigated bogs

Номер и название болота [9] No. and title of the bog [9]	Положение в рельефе Position in relief	F, га (ha) [9]	H, м (m) [9]	Основные виды торфяной залежи The main types of peat deposit	Число скважин и проб торфа Number of peat wells and samples
Верховые сфагновые болота/Highland acidbogs					
№ 397 Васюганское (участок 5 у с. Кр. Бакчар) № 397 Vasyuganskoe (area 5 near Bakchar)	Междуречье рек Бакчар–Икса южнее дороги Томск–Бакчар Bakchar–Iksa interfluvium to the south of Tomsk–Bakchar road	17918	1,94	В. фускум, магелланикум, п. топяная U. fuscum, magellanicum, T. swampy	12 (77)
№ 397 Васюганское (участок 22) № 397 Vasyuganskoe (area 22)	Междуречье в районе слияния р. Ча́я–Ню́рса у с. Стрельниково Chaya–Nyursa interfluvium near Strelnikovo	14917	2,81	В. Фускум, магелланикум, н. лесотопяная U. fuscum, magellanicum, L. woody-swampy	11(68)
№ 768 Семиозерье (юго-западный участок) № 768 Semiozerye (south-west area)	Древняя ложбина стока в Кеть-Чулым- ском междуречье Ancient shallow of flow in Ket-Chulyum in- terfluvium	5984	2,66	В. фускум, комплексная, п. топяная U. fuscum, complex, T. swampy	7(55)
№ 679 Полудёновское № 679 Poludenovskoe	Третья левобережная терраса р. Кеть у с. Белый Яр The third left bank terrace of the river Ket near Bely Yar	19503	2,47	В. фускум, комплексная, н. топяно-лесная U. fuscum, complex, L. swampy-woody	6(46)
№ 542 Колпашевское № 542 Kolpashevskoe	Первая и вторая левобережная терраса р. Кеть, на юг от с. Тилсино The first and the second left bank terrace of the river Ket, to the south from Tipsino	8553	2,18	В. фускум, п. топяная, н. многослойная лесотопяная U. fuscum, T. swampy, L. multilayer woody-swampy	8 (47)
Низинные болота/Lowland bogs					
№ 755 Суховское (южный участок) № 755 Sukhovskoe (south area)	Первая левобережная терраса р. Бакчар The first left bank terrace of the river Bakchar	3434	3,27	Н. лесная, осоковая, осоково-гипсовая L. woody, sedgy, sedge-hypnum	9 (76)
№ 932 Клюквенное № 932 Klyukvennoe	Правобережная терраса р. Томь Right bank terrace of the river Tom	4800	3,26	Н. топяно-лесная, многослойная лесотопяная L. swampy-woody, multilayer woody-swampy	7 (45)
№ 902 Гусевское (южный участок) № 902 Gusevskoe (south are)	Вторая и третья левобережная терраса р. Обь The second and the third left bank terrace of the river Ob	7600	1,77	Н. осоковая, древесно-осоко- вая, осоково-гипсовая, топяно-лесная, лесо-топяная L. sedgy, woody-sedge, sedge-hypnum, swampy-woo- dy, woody-swampy	14 (76)

F, H – площадь и средняя глубина торфяной залежи; В, П, Н – верховая, переходная, низинная залежь.

F, H are the area and average depth of peat deposit; U, T, L are upland, transition, lowland deposit.

### Методика исследований

В ходе полевых работ обследовано 8 болот таежной зоны (южная тайга), расположенных на территории Томской области (таблица). Доминирующие в таежной зоне Западной Сибири верховые сфагновые болота в южной тайге сложены разнотипными залежами. В Обь-Иртышском междуречье такие болота занимают водоразделы рек, образуя крупнейшую в мире Васюганскую болотную систему. Обследованные участки этой системы (№ 5, 22) входят в состав Большого Васюганского болота (БВБ) общей площадью 3,582 млн га [10]. Состав и строение изученных участков характерны для северных отрогов БВБ, занимающих вторичные водоразделы рек бассейна Оби: Шегарки, Иксы, Бакчара. Ряд изученных верховых болот южной тайги (Семиозёрье, Колпашевское, Полудёновское) расположены на террасах и склонах водоразделов правых притоков Оби (Чулым, Кеть). Крупные низинные болота представлены торфяниками Суховское, Гусевское (левобережье Оби) и Ключевное (правобережье Оби).

Пробы торфа отбирали на типичных для каждого болота участках торфяной залежи в 6–14 пунктах (таблица), выбранных по материалам геологической разведки и в основном совпадающих с пунктами разведочной сети. Пробы отбирали ручным торфяным буром на полную глубину залежи послойно с интервалом 0,5 м. Всего было отобрано 490 проб. В пробах определено содержание золы (ГОСТ 11306–83), влаги (ГОСТ 11305–83) и марганца.

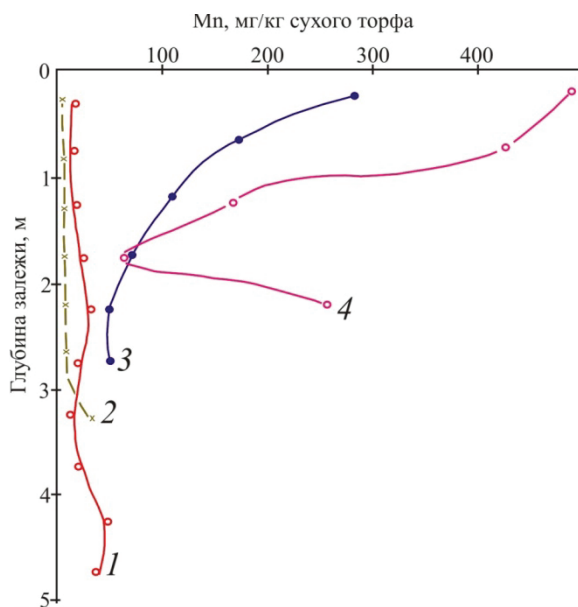
Определение марганца в торфе основано на окислении ионов марганца персульфатом аммония в азотнокислом растворе в присутствии нитрата серебра и фосфорной кислоты и последующем фотоколориметрическом анализе окрашенного раствора [11]. Для этого навеску торфа спекают со смесью Эшка при 815 °С в течение 2-х часов. Полученный спек растворяют в разбавленной 1:3 серной кислоте, затем упаривают раствор, а сухой остаток растворяют в 3 % азотной кислоте. После окисления марганца до перманганата его содержание в окрашенном растворе определяют на фотоколориметре КФК-2МП в кювете 50 мм при длине волны 530 нм.

### Обсуждение результатов

Анализ полученных данных по распределению марганца в торфяных залежах изученных болот (таблица) показал, что содержание Mn изменяется в широком диапазоне – от нескольких десятков (20...30 мг/кг) до 950 мг/кг сухого торфа. Пониженные уровни накопления марганца характерны для верховых сфагновых болот, доминирующих в подзоне средней и южной тайги Томской области. Эта особенность верховых сфагновых болот обусловлена их ландшафтно-геохимической спецификой, связанной с их расположением в рельефе. Представителями таких болот являются участки Васюганской болотной системы – № 5 у с. Красный Бакчар и № 22. Эти участки занимают между-

речья притоков р. Чаи – Бакчара, Иксы, Нюрсы. В структуре таких болот наблюдается зональность болотных ландшафтов, четко выраженная в расположении и строении болотных водосборов на аэрокосмических снимках болотных массивов. Последовательность расположения отдельных участков торфяных залежей подчиняется закономерностям развития ландшафтно-геохимических систем [12], элементарным звеном которых является однородный участок торфяной залежи – болотный биогеоценоз в терминологии О.Л. Лисс [5].

Расположение болотных биогеоценозов (ББГЦ) можно представить как каскадную ландшафтно-геохимическую систему (КЛГС), в которой выделяется водораздельная зона, зона склона и периферийная зона, примыкающая к водоприемнику. В центральной водораздельной части болотного массива обычно располагается верховая сфагновая залежь (фускум, комплексная, грядово-мочажинная). Это звено является автономной частью КЛГС, т. к. получает атмосферное питание и не зависит от остальных звеньев КЛГС. Эта часть болотного массива наиболее бедна по минеральному составу. Содержание марганца в торфе не превышает 100 мг/кг (рис. 1) и несколько возрастает по глубине. На склонах водосбора располагаются более требовательные к питанию залежи лесной группы. Этот участок получает питание продуктами разложения с водораздела и одновременно происходит вынос продуктов разложения и выщелачивания в депрессию болотного водотока. Эти участки геохимически подчинены, т. к. вследствие направленной латеральной миграции в них привносится (частично проходит транзитом) питание с вышерасположенных по водосбору склона и водораздела болотного массива. Зона, примыкающая к водоприемнику часто занята переходными, смешанными и низинными залежами, обогащенными марганцем (рис. 1). Как правило, периферийная залежь окаймляет широкой полосой центральную часть болотного массива. Содержание марганца в этой зоне обычно снижается по глубине залежи. Это связано с биологическим поглощением марганца корневой системой болотных растений. Все растения отличаются специфической потребностью в марганце, и, вероятно, наиболее важной его функцией является участие в окислительно-восстановительных реакциях. Известно, что  $Mn^{2+}$  – специфический компонент двух ферментов: аргиназы и фосфотрансферазы. Он может также замещать магний в других ферментах. Механизм, посредством которого  $Mn^{2+}$  увеличивает активность некоторых оксидаз, точно пока не установлен, но предполагается, что это связано с изменением валентности между  $Mn^{3+}$  и  $Mn^{2+}$ . Марганец участвует в кислородобразующей системе фотосинтеза, а также играет основную роль в переносе электронов фотосинтезирующей системы. По-видимому, слабосвязанная в хлоропластах форма марганца участвует в выделении кислорода, тогда как прочносвязанная его форма участвует в переносе электронов при фотосинтезе [13].



**Рис. 1.** Послойное распределение марганца по глубине торфяных залежей верховых сфагновых болот: 1 – фускум залежь (Васюганское уч. 5, центр массива); 2 – магелланикум залежь (Васюганское уч. 5, центр массива); 3 – переходная топяная (Васюганское уч. 5, периферия); 4 – низинная многослойная лесо-топяная (Колпашевское, терраса р. Кеть)

**Fig. 1.** Manganese layered distribution over peat deposit depth in upland acid bogs: 1 – fuscum-deposit (Vasyuganskoe area 5, the center of the array); 2 – magellanicum-deposit (Vasyuganskoe area 5, the center of the array); 3 – transition swampy (Vasyuganskoe area 5, periphery); 4 – lowland multilayer woody-swampy (Kolpashevskoe, terrace of the river Ket)

Периферийная зона хорошо выражена на разнотипных болотах таёжной зоны Томской области, но ее доля в общей площади болот непостоянна. Она возрастает с севера на юг, и в южной тайге ее участие гораздо выше, чем в средней. Содержание Mn в залежах этой зоны обычно выше 100 мг/кг и достигает 300...400 мг/кг в наиболее богатых слоях залежи (рис. 1). Среди верховых болот высокими уровнями накопления Mn отличаются верховые сфагновые болота террасного залегания – Колпашевское, Семиозёрье и другие разнотипные болотные массивы южной тайги.

Наиболее обогащены марганцем низинные болота, расположенные в долинах рек – на низких террасах и в поймах. Среди исследованных болот к таким относятся Суховское, Гусевское, Клюквенное. Они полностью сложены низинной залежью и достигают значительных размеров – до 10 тыс. га. Однако большая часть низинных болот относится к малым, площадью менее 1000 га [14], и характеризуются повышенной зольностью. Богатое минеральное питание низинных болот обеспечивается главным образом за счет привноса минеральных веществ с почвенно-грунтовыми водами, а в ряде случаев – поступлением и делювиальными наносов. Условия водно-минерального питания таких болот, а следовательно, величина зольности торфов и

состав их минеральной части находится в зависимости от геоморфологического окружения торфяника и характера водосбора. В таёжной зоне состав почвенно-грунтовых вод формируется при определяющем влиянии процессов торфонакопления и заболачивания. Первым звеном в формировании почвенно-грунтовых вод являются верховые болота водоразделов, на которых атмосферная влага обогащается органическими и минеральными соединениями торфяных залежей и подстилающих грунтов. В дальнейшем почвенно-грунтовые воды с водораздельных болот поступают на прилегающие заболоченные территории склонов водоразделов и затем в низинные болота речных террас и пойм. Таким образом, при современном уровне заболачивания таёжной зоны Западной Сибири и Томской области миграция химических элементов протекает в сопряженных геохимических ландшафтах, включающих в качестве автономного звена верховое болото водораздела, а в качестве подчиненного – низинное болото речной долины. В качестве промежуточного звена выступают разной степени заболоченные леса на склонах водоразделов. Примером такой КЛГС является сопряженная система, включающая верховое болото Кайтас № 901, гидравлически связанное с ним низинное болото Гусевское № 902, расположенное на 2–3 левобережной террасе р. Обь (рис. 2) и болото Обское II № 903, занимающее левобережную пойму р. Обь. В данной сложной системе формирование почвенно-грунтовых вод и мобилизация марганца локализуется на болоте Кайтас и в подстилающих грунтах болотного массива. Далее образовавшиеся почвенно-грунтовые воды с речным и подземным стоком поступают в торфяную залежь болота Гусевское и распределяются по его объему. При этом часть марганца включается в биологический круговорот, часть адсорбируется торфяной залежью, а остаток с дополнительно образовавшимся марганцем в процессе торфообразования поступает с гидрохимическим стоком в нижнюю ступень КЛГС – пойменное болото Обское II.

Богатое водно-минеральное питание болотного массива Гусевское привело к повышенной минерализации торфяной залежи и обогащению ее железом [6]. Из результатов анализа 76 проб южного участка болота установлено, что содержание марганца колеблется в интервале 128...892 мг/кг сухого торфа. Содержание марганца имеет разный характер распределения по глубине торфяной залежи. Распространённые на торфянике низинные древесно-осоковые и топяно-лесные залежи отличаются однородностью в распределении марганца по глубине и средними значениями 500...600 мг/кг сухого торфа (рис. 3). Обычно отмечается обогащение марганцем придонных слоев залежи, иногда до 700...800 мг/кг. Нередки случаи слабовыраженного обогащения марганцем поверхностного слоя залежи. В центральных участках массива отмечены случаи низкого содержания марганца в поверхностном слое залежи – около

100 мг/кг, при этом обычно наблюдается быстрый рост содержания марганца по глубине. Минерализация придонных слоёв торфяной залежи широко распространена на торфяных болотах и связана с выщелачиванием подстилающего грунта кислыми продуктами разложения торфа (карбоновые и фульвокислоты).

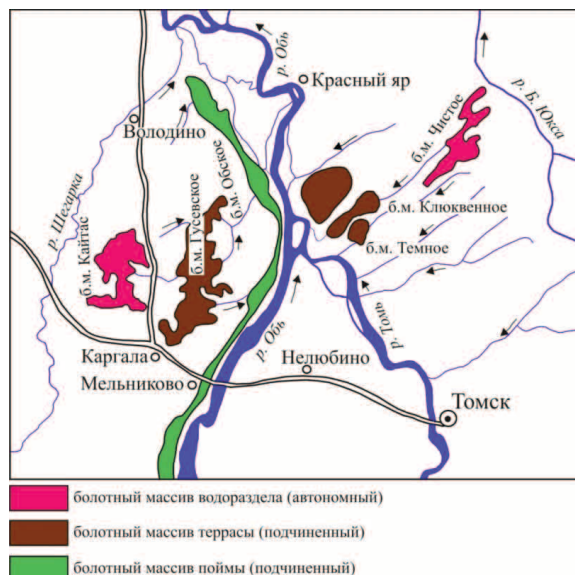


Рис. 2. Схема расположения геохимически сопряженных болотных массивов (б. м.)

Fig. 2. Diagram of geochemically conjugated bog massifs (b. m.) location

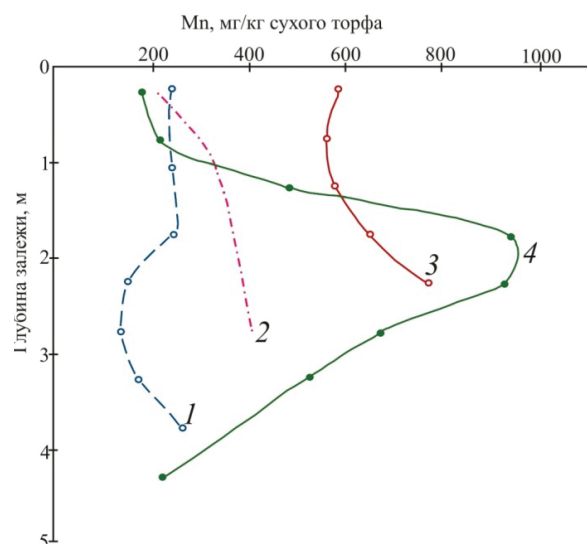


Рис. 3. Послойное распределение марганца в низинных залежах болот речных долин: 1 – лесная (Суховское, терраса р. Бакчар); 2 – топяно-лесная (Клюквенное, терраса р. Томь); 3 – лесо-топяная (Гусевское, терраса р. Обь); 4 – осоково-гишновая (Суховское, терраса р. Бакчар)

Fig. 3. Manganese layered distribution in lowland deposits of the river valleys bogs: 1 – woody (Sukhovskoe, terrace of the river Bakchar); 2 – swampy-woody (Klyukvennoe, terrace of the river Tom); 3 – woody-swampy (Gusevskoe, terrace of the river Ob); 4 – sedge-hypnum (Sukhovskoe, terrace of the river Bakchar)

Особенностью минерального состава болотного массива Суховское является известковистая минерализация средних и глубоких слоев торфа [8]. В.М. Елисеева [15] также отмечала совместные отложения в залежи болота Суховское карбонатных и железистых слоев торфа, однако на исследованном нами южном участке обнаружена только карбонатная минерализация. Содержание железа в торфе обычно не превышает 1...2 % [6].

По результатам определения марганца в торфе болотного массива Суховское установлено, что содержание марганца обычно выше 100 и доходит до 950 мг/кг сухого торфа. На участке лесной залежи среднее содержание марганца составляет 200...300 мг/кг. Наиболее распространенные на торфянике осоковые и осоково-гишновые залежи характеризуются выраженным максимумом содержания марганца в средних и глубоких слоях залежи. Такое распределение отмечено в 6 из 9 пунктов отбора (рис. 3). Наиболее высокие содержания марганца (940–950 мг/кг) выявлены в обогащенных слоях торфа в южной половине изученного участка. В северной половине торфяника также обнаружены обогащенные марганцем слои, но содержание марганца в них не превышает 600 мг/кг. По результатам данного и ранее проведенных исследований [8] обнаружена хорошо выраженная синхронность в обогащении торфяных слоев марганцем и кальцием. Причиной этого может быть повышенная величина pH в слоях, обогащенных кальцием [16]. Вследствие этого происходит осаждение марганца из поверхностно-сточных и почвенно-грунтовых вод, питающих торфяную залежь.

Минерализация низинных болот довольно широко распространена в долинах рек таёжной зоны Западной Сибири. На территории Томской области минерализованные болота речных долин преимущественно встречаются в южной части Обь-Иртышского междуречья. Это связано с литологическим составом почвообразующих пород и гидрологическим режимом активной зоны водообмена на этой территории [17, 18]. В геохимически сопряженных болотных ландшафтах долинных болота выступают как геохимические барьеры. В этом проявляется геохимическое своеобразие надпойменных террас [19]. Чем выше терраса, тем сложнее история ее ландшафта, тем больше прошло времени после пойменной стадии, тем контрастнее климатические изменения. В геохимических особенностях почв и аллювия запечатлена история этих ландшафтов, истории колебаний климата, бика (в терминологии А.И. Перельмана), грунтовых вод. Почвы и болота террас содержат геохимические реликты, преимущественно следы былых геохимических барьеров в виде гумусовых железистых, марганцевых, известковых и других аккумуляций. В Томской области минерализованные болота преимущественно расположены в речных долинах южной тайги, подтайги и лесостепи. К ним относятся Аркадьёво, Усть-Кандинское,

Карбышевское и многие небольшие болота со средней зольностью торфа выше 25 % [20].

Следует отметить, что повышенное содержание марганца, сопутствующее карбонатной минерализации, приурочено к средней части площади болотного массива Суховское. По нашим данным на участках с лесной залежью содержание марганца в среднем ниже 400 мг/кг и более стабильно по глубине (рис. 3).

Болотный массив Клюквенное расположен в правобережной части области на надпойменной террасе реки Томь при ее слиянии с Обью. Водно-минеральное питание болотного массива формировалось под влиянием литологического состава вмещающих пород, среди которых преобладали песчаные разности. Это благоприятствовало дренированию торфяной залежи и отложению торфов с пониженной зольностью. Среди торфяных залежей преобладают нормально зольные топяно-лесные, древесно-осоковые, осоковые с зольностью 10...15 %. Содержание марганца в пробах торфа изменяется в пределах 123...680 мг/кг, в среднем составляет 300...400 мг/кг сухого торфа. Следует отметить однородное распределение марганца по глубине залежи. Обычно содержание марганца монотонно повышается от поверхности к подошве залежи. Такой характер распределения распространен в низинных лесных, лесо-топяных, древесно-осоковых залежах террасного залегания. Стабильность химического состава по глубине подболотных залежей обеспечивается особенностями древесных насаждений, которые периодически переносят органическую массу (фитомассу) из глубины залежи на ее поверхность в виде листового опада [21].

Распределение марганца по болотным массивам речных долин согласуется с представлениями о геохимических барьерах [11, 19]. Торфяная залежь при этом рассматривается как сложный геохимический барьер на путях миграции почвенно-грунтовых и поверхностно-сточных вод от верховых болот водоразделов (автономный геохимический ландшафт) по склонам и понижениям рельефа, через почвенно-грунтовые толщи и торфяные залежи надпойменных террас и речных пойм в местную гидрографическую сеть. По мерепрохождения через звенья каскадной ландшафтно-геохимической системы исходная атмосферная вода обогащается различными компонентами в зонах торфонакопления, оподзоливания, оглеения. Таким образом, состав водно-минерального питания террасных болот определяется составом вмещающих рыхлых пород болотных водосборов и протекающими в них ландшафтно-геохимическими процессами. В соответствии с водно-минеральными режимами формировались торфяные залежи определенного типа и вида со своим минеральным составом.

Таковы террасные болота левобережья и правобережья Оби, питание которых обеспечивали почвенно-грунтовые и поверхностно-сточные воды,

сформировавшиеся в подстилающих грунтах различного происхождения [22]. На правобережье в подстилающих грунтах преобладают отложения пайдугинской свиты и аллювиальные отложения террас, представленные песками, песками с гравием. На левобережье определяющее влияние на формирование и развитие болот оказали глинистые слабопроницаемые отложения смирновской свиты с фрагментами сузгунской толщи на террасах. Влияние литологического и химического состава пород отразилось на строении и минеральном составе болот левобережья и правобережья Томской области. В частности, изученное в данной работе террасное болото Гусевское (левобережье) и Клюквенное (правобережье) близки по географическому положению, но получали разное водно-минеральное питание, что обусловило различия в строении торфяных залежей и их минеральном составе. Если в строении залежей болотного массива Гусевское большое участие принимают гипсовые и осоково-гипсовые торфа (таблица) с повышенной зольностью, то залежь болота Клюквенное сложена в основном торфами лесной группы нормально-зольного состава. Как видно из полученных данных, и в содержании марганца выдерживается такое же соотношение (рис. 3). Определяющее влияние на эти различия оказало четкое разделение правобережья левобережья Томской области по литохимическому составу подстилающих пород и минерализации природных вод, питающих торфяные болота [17, 22–24]. Так, болотный массив Клюквенное получает водно-минеральное питание от гидравлически связанного с ним верхового водораздельного болота Чистое путем поверхностного стока (р. Шишкобойка), поверхностно-сточных и почвенно-грунтовых вод. Последние формируются в торфяной залежи и песчаных грунтах, подстилающих древнюю ложбину стока, вмещающую залежь болотного массива Чистое.

#### Заключение

Распределение марганца изучено на 8 торфяных болотах Томской области верхового (5 объектов) и низинного (3 объекта) типа. Наиболее низкие содержания марганца (менее 100 мг/кг) абсолютно сухого торфа характерны для центральных участков доминирующих в Западной Сибири верховых, сфагновых болот водораздельного залегания. Содержание марганца в залежах таких болот несколько возрастает с глубиной. Более обогащена марганцем периферийная зона верховых болот водоразделов. Здесь содержание марганца выше 100 мг/кг и достигает 300...400 мг/кг. Содержание марганца в залежах периферии максимально в поверхностных слоях и снижается с глубиной.

Наиболее высокое содержание марганца обнаружено в торфяных залежах долинных болот. Здесь оно доходит до 900 мг/кг и выше. Обычно залежи долинных болот сложены низинными торфами с повышенной зольностью. В геохимически сопряженных болотных ландшафтах болота реч-



ных долин играют подчиненную роль и выступают в качестве геохимических барьеров, на которых нередко формируются карбонатные, железистые и марганцовистые аккумуляции. Среди изученных болот карбонатная аккумуляция встречается в

террасном болоте Суховское на средней глубине залежи, около 2,5 м. К этому горизонту приурочен слой торфа, обогащенный марганцем. Содержание марганца в этом слое достигает 950 мг/кг, что в 4 раза выше, чем в смежных слоях

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. – М.: Высшая школа, 2005. – 558 с.
2. Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таёжной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 173–178.
3. Роль органического вещества торфяных болот в миграции элементов и минералообразовании / К.И. Лукашев, В.А. Ковалев, А.Л. Жуховицкая, В.А. Генералова // Исследования органического вещества современных и ископаемых осадков. – М.: Наука, 1976. – С.142–147.
4. Маслов В.С. Гидрология торфяных болот. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 266 с.
5. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов и др. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
6. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezchikov V.J. Distribution of Iron Compounds in Peat Deposits of the central part of western Siberia // Eurasian Soil Sci. – 1995. – V. 27. – № 7. – P. 65–76.
7. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezchikov V.J., Distribution of Iron, Cobalt, and Chrome in Peatlands of the Central Part of Western Siberia // Eurasian Soil Sci. – 2000. – V. 33. – № 12. – P. 1265–1272.
8. Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция в торфяных залежах Центральной части Западной Сибири // Почвоведение. – 2006. – № 3. – С. 293–302.
9. Торфяные месторождения Томской области / под ред. Я.Н. Задунайского, И.Н. Казакова, В.Д. Маркова и др. – М.: Геолторфоразведка, 1971. – 306 с.
10. Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота / В.К. Бернатонис, В.С. Архипов, М.А. Здвижков и др. // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 204–215.
11. Pansu M., Gautheyrou J., Loyer J.Y. Soil analysis – Sampling, Instrumentation and Quality control. – Tokyo; Lisse; Abington; Exton: Balkema, 2001. – 489 p.
12. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
13. Mengel K., Kirkby E.A. Principles of Plant Nutrition. – Worblaufen; Bern: International Potash Institute, 1978. – 593 p.
14. Природные ресурсы Томской области / А.Г. Дюкарев, Ю.А. Львов, В.А. Хмельев и др. – Новосибирск: Наука, 1991. – 176 с.
15. Елисеева В.М. О путях сельскохозяйственного освоения низинных болот таёжной зоны Томской области. – Томск: Изд-во ТГУ, 1963. – 98 с.
16. Ефимов В.Н. Торфяные почвы и их плодородие. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 264 с.
17. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 248 с.
18. Ермашова Н.А. Природный гидрогеохимический фон верхней гидродинамической зоны среднего Приобья, как основа оценки её экологического состояния // Обской вестник. – 1999. – № 3–4. – С. 106–112.
19. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
20. Отчет по теме 1/414 «Обобщение материалов и прогнозная оценка торфяных ресурсов в перспективных районах интенсивного хозяйственного освоения Западной Сибири». Т. 2. Кн. 3. Томский район. – М.: Мингео РСФСР ПГО «Торфгеология», 1983. – 64 с.
21. Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. – Новосибирск: Наука, 1986. – 192 с.
22. Евсеева Н.С., Синюткина А.С., Харанжевская Ю.А. Ландшафты болот Томской области. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – 400 с.
23. Емельянова Т.А. Инженерно-геологическая изученность и региональная типизация геологической среды Томской области // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 59–63.
24. Герасимова А.С. Инженерно-геологические особенности южной части Западно-Сибирской плиты. – М.: МГУ, 1975. – С. 246–262.

Поступила 12.04.2015 г.

UDS 631.811.944.631.445.12

## DISTRIBUTION OF MANGANESE IN PEAT DEPOSIT OF TOMSK REGION

**Victor S. Arkhipov,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vsa@tpu.ru

**Vilis K. Bernatonis,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bernatonisvk@tpu.ru

**The aim of the research** is to study manganese distribution in peat deposits of Tomsk region. The patterns in distribution of iron, calcium and some trace elements in peat deposits of Tomsk region were previously identified.

**Relevance.** The development of peat resources of Tomsk region will allow manufacturing peat products for agriculture, medicine and power engineering. The skillful use of peat requires the knowledge of not only the technological properties of peat, but also its mineral composition, especially the content of biologically active elements, which include manganese.

**Methods of research.** During the research, the fieldwork was conducted in peat bogs of the Tomsk region. The authors have selected stratified samples of peat on 8 swamps of taiga zone in Tomsk region and surveyed horse watershed mires and fens river valleys. Manganese content in peat was determined by manganese ions oxidation in nitric acid solution with ammonium persulfate in the presence of silver nitrate. The concentration of permanganate ions in solution was determined on photocolormeter KLF-2MP with 50 mm cuvette at wavelength of 530 nm.

**Results.** It was found out that manganese content in peat deposits of taiga zone in Tomsk region varies from 20...50 to 900...950 mg/kg of dry peat. The minimum content of manganese was detected in the centers of the upland watershed wetlands, and the maximum content was detected in lowland swamps of river valleys. On the periphery of large wetland systems the transient and low-lying deposits with manganese content of 200...300 mg/kg are widely spread. The peat layers with lime mineralization are the most manganese-rich.

**Conclusions.** The distribution of manganese in the bogs and systems of varying complexity obeys the laws of landscape-geochemical systems. The geochemically conjugated autonomous and subordinate units related to migration flows and wetland soil and groundwater are among them.

### Key words:

Peat deposit, manganese, distribution, accumulation, migration.

### REFERENCES

1. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I. *Khimiya pochv* [Chemistry of soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 558 p.
2. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Raspredelenie kaltsiya i zheleza v vertikalnom profile torfyanykh zalezhey taezhnoy zony Zapadnoy Sibiri [Calcium and iron distribution in vertical profile of peat bogs in western Siberia taiga zone]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 173–178.
3. Lukashev K.I., Kovalev V.A., Zhukhovitskaya A.L., Generalova V.A. Rol organicheskogo veshchestva torfyanykh bolot v migratsii elementov i mineralobrazovanii [Role of organic substance of peat bogs and elements migration in mineral formation]. *Issledovaniya organicheskogo veshchestva sovremennykh i iskopayemykh osadkov* [Investigation of organic substance of current and fossil sediments]. Moscow, Nauka Publ., 1976. pp. 142–147.
4. Maslov B.S. *Gidrologiya torfyanykh bolot* [Hydrology of Peat Bogs]. Moscow, Rosselkhozakademiya Publ., 2009. 266 p.
5. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Marsh system of Western Siberia and their ecological importance]. Tula, Griffi K Publ., 2001. 584 p.
6. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezchikov V.J. Distribution of Iron Compounds in Peat Deposits of the central part of western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 1995, vol. 27, no. 7, pp. 65–76.
7. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Rezchikov V.J., Distribution of Iron, Cobalt, and Chrome in Peatlands of the Central Part of Western Siberia. *Eurasian Soil Sci.*, 2000, vol. 33, no. 12, pp. 1265–1272.
8. Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Raspredelenie kaltsiya v torfyanykh zalezhakh Tsentralnoy chasti Zapadnoy Sibiri [Calcium distribution in peat deposits of central part of Western Siberia]. *Pochvovedenie*, 2006, no. 3, pp. 293–302.
9. *Torfyanye mestorozhdeniya Tomskoy oblasti* [Peatland of Tomsk region]. Ed. by Ya.N. Zadunaysky, I.N. Kazakov, V.D. Markov. Moscow, Geol'torforazvedka Publ., 1971. 306 p.
10. Bernatonis V.K., Arkhipov V.S., Zdvizhkov M.A. Geokhimiya rasteniy i torfov Bolshogo Vasyuganskogo bolota [Geochemistry of plants and peats in Great Vasyugan Bog]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan bog. Current state and development]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2002. pp. 204–215.
11. Pansu M., Gautheyrou J., Loyer J.Y. *Soil analysis – Sampling, Instrumentation and Quality control*. Tokyo; Lisse; Abington; Exton: Balkema, 2001. 489 p.
12. Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and industrial landscape of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 328 p.
13. Mengel K., Kirkby E.A. *Principles of Plant Nutrition*. Worblaufen; Bern, International Potash Institute, 1978. 593 p.
14. Dyukarev A.G., Lvov Yu.A., Khmelev V.A. *Prirodnye resursy Tomskoy oblasti* [Natural resource of Tomsk region]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 176 p.
15. Eliseeva V.M. *O putyakh selskohozyaystvennogo osvoeniya nizinykh bolot taezhnoy zony Tomskoy oblasti* [On the ways of agricultural assimilation of low-moor peat bogs in taiga zone of Tomsk region]. Tomsk, TGU Press, 1963. 98 p.
16. Efimov V.N. *Torfyanye pochvy i ikh plodorodie* [Peat soils and their fertility]. Leningrad, Agropromizdat Publ., 1986. 264 p.
17. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Hydro resources of Tomsk region]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 248 p.
18. Ermashova N.A. Prirodny gidrogeokhimicheskiy fon verkhney gidrodinamicheskoy zony srednego Priobya, kak osnova otsenki

- ее ekologicheskogo sostoyaniya [Natural hydrogeochemical background of the upper hydrodynamic zone in Middle Ob as the base for assessing its ecological state]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 106–112.
19. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.
  20. *Otchetpoteme 1/414 «Obobshchenie materialov i prognoznaya otsenka torfyanykh resursov v perspektivnykh rayonakh intensivnogo khozyaystvennogo osvoeniya Zapadnoy Sibiri». T. 2. Kn. 3. Tomsky rayon* [Generalization of materials and prognosis note of peat resources in long-range regions of intensive economic assimilation of Western Siberia. V. 2. B. 3. Tomsk region]. Moscow, Mingeo RSFSR PGO «Torfgeologiya» Publ., 1983. 64 p.
  21. Bakhnov V.K. *Biogekhimicheskie aspekty bolotoobrazovatel'nogo protsessa* [Biogeochemical aspects of bog formation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 192 p.
  22. Evseeva N.S., Sinyutkina A.S., Kharanzhevskaya Yu.A. *Landshafty bolot Tomskoy oblasti* [Landscapes of Tomsk region bogs]. Tomsk, NTL Publ., 2012. 400 p.
  23. Emelyanova T.A. *Inzhenerno-geologicheskaya izuchennost i regionalnaya tipizatsiya geologicheskoy sredy Tomskoy oblasti* [Engineering and geological survey and regional typing of geological environment of Tomsk region]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 59–63.
  24. Gerasimova A.S. *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti yuzhnoy chasti Zapadno-Sibirskoy plity* [Engineering geological peculiarity of south part of western Siberian Plate]. Moscow, MGU Press, 1975. pp. 246–262.

Received: 12 April 2015.

УДК 004.89

## РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАНЖИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕКСТОВОГО ПОИСКА В БАЗАХ ДАННЫХ СИСТЕМ ГЕОМОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**Тарков Михаил Сергеевич,**

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физических основ  
материаловедения кремния Института физики полупроводников  
им. А.В. Ржанова СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск,  
пр. Ак. Лаврентьева, 13. E-mail: tarkov@isp.nsc.ru

**Кожушко Оюна Алексеевна,**

аспирант Новосибирского государственного университета,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2. E-mail: oyuna@mail.ru

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью изучения поведения алгоритмов текстового ранжирования. Практическую ценность исследование представляет для разработчиков поисковых систем, в том числе при решении задач распознавания и адаптивной классификации объектов по данным спутниковых систем геомониторинга.

**Цель исследования:** изучение нейросетевой модели алгоритма ранжирования текстовых документов в базах данных систем геомониторинга, построенной на основе использования сети Кохонена, многослойных персептронов и метода кластеризации *k-means*.

**Методы исследования:** программная реализация и тестирование нейросетевых алгоритмов ранжирования путем сравнения результатов их работы с результатами классического алгоритма ранжирования *OkapiBm25*.

**Результаты исследования.** Предложен алгоритм идентификации систем текстового поиска в базах данных систем геомониторинга, построенный на основе нейросетевых моделей обработки данных и включающий факторный и регрессионный анализ данных. Факторный анализ включает кластеризацию данных на основе использования сети Кохонена. Для упрощения обучения разработан алгоритм факторного анализа, исключающий малозначимые для ранжирования характеристики. Результатом работы моделей является набор значимых при ранжировании характеристик и их оптимальные значения. Для проведения регрессионного анализа предлагается использовать одну из двух нейросетевых моделей: на основе гибридной нейронной сети или на основе комплекса многослойных персептронов. Выбор модели регрессионного анализа осуществляется на основе результатов кластерного и факторного анализа. В случае выделения большого числа кластеров входных векторов предпочтительнее использование модели на основе гибридной нейронной сети. В случае слабых пересечений наборов значимых характеристик между кластерами предпочтительнее использование модели на основе комплекса многослойных персептронов. Результаты тестирования алгоритма показывают успешное обучение моделей и низкие значения ошибок обучения и тестирования. Предложенные модели апробированы на тестовых данных алгоритма семейства *OkapiBm25*, и выявлены особенности их применения в зависимости от характеристик входных данных.

### **Ключевые слова:**

Базы данных систем геомониторинга, алгоритм текстового ранжирования, регрессионный анализ, факторный анализ, классификация, кластеризация, нейронные сети, сеть Кохонена, многослойный персептрон.

### **Введение**

Эффективный поиск документов в базах данных систем геомониторинга [1] с каждым годом превращается во все более сложную задачу. Причиной этого являются быстрый рост объема информации и появление новых особенностей коллекции веб-документов. Современные поисковые системы постоянно оптимизируют свою работу, уделяя большое внимание ранжированию найденных документов по степени их релевантности запросу [2]. Для решения данной задачи в настоящее время активно используется машинное обучение системы поиска по ассессорским базам знаний [3] или на основе статистической информации [4, 5]. Такой подход позволяет достичь высокой эффективности, однако делает алгоритм ранжирования «черным ящиком», что приводит к проблеме идентификации системы и поиска ее ключевых элементов [6]. Многие исследователи сконцентрированы на проблеме повышения качества поиска, мало затрагивая задачу идентификации алгоритма ранжиро-

вания. Идентификация алгоритма позволяет: оценить поведение алгоритма ранжирования в зависимости от разных входных данных, выявить аномалии в работе алгоритма и возможности повышения качества за счет оптимизации использования отдельных факторов. Кроме сферы информационного поиска результаты решения данной задачи востребованы в области интернет-маркетинга в направлении поисковой оптимизации веб-сайтов [7]. Изучение систем ранжирования также важно при дистанционном зондировании Земли [8].

Ранее для анализа алгоритма ранжирования применялись статистические методы [9], показывавшие удовлетворительные результаты для явных алгоритмов, таких как алгоритм текстового ранжирования Яндекс *Atr* [10]. С началом использования скрытых алгоритмов появилась необходимость изменения методов анализа и применение методов машинного обучения. И. Зябreyвым, О. Пожарковым и И. Пожарковой предложены: алгоритм оценки оптимальных значений некоторых

характеристик документов с помощью генетических алгоритмов [11, 12], метод моделирования алгоритма ранжирования Яндекс с помощью технологии MatrixNet [13]. Эти методы позволили выявить важные особенности алгоритма, но не обладают возможностью дообучения, что ограничивает их применимость в условиях частых изменений настроек алгоритма и расширения обучающих данных. В данной статье задача анализа алгоритма ранжирования решается с помощью нейросетевого подхода, позволяющего производить дообучение системы [14–16]. Ранее для решения этой задачи нейронные сети не применялись, однако известны примеры их успешного применения для других задач идентификации [17] и анализа текстовых документов [18].

### Постановка задачи

Анализ скрытого алгоритма ранжирования является задачей интеллектуального анализа данных (Data Mining) [19], для решения которой необходимо выявить факторы, оказывающие существенное влияние на результат ранжирования, и зависимость позиций документов от значений этих факторов. Исследуемые данные представляются в векторном виде, где компонентам векторов соответствуют факторы, характеризующие документы и запросы. Примерами таких факторов являются длина документа, цитируемость документа, количество слов в запросе и другие.

Алгоритм ранжирования поисковой системы строит функцию релевантности, которая сопоставляет паре векторов  $(q, d)$ , описывающих документ и текстовый запрос соответственно, числовую оценку релевантности  $rel$  [20]:

$$f(q, d) \rightarrow rel.$$

Решение задачи идентификации алгоритма ранжирования сводится к построению модели, которая по заданным векторам  $(q, d)$  определяет степень релевантности документа  $d$  запросу  $q$ . Степень релевантности определяется как ранг, присваиваемый документу  $d$  при ранжировании по запросу  $q$ . Обычно разделяют несколько степеней релевантности (например, высокорелевантный, среднерелевантный и низкорелевантный) и каждой степени сопоставляется несколько рангов.

В данной работе рассмотрен частный случай описанной задачи идентификации. Требуется определить значимые факторы и их значения, достаточные для определения принадлежности или непринадлежности документа классу документов, которые релеванты заданному запросу. Таким образом, в задаче рассматривается только одна степень релевантности, и решение задачи позволит ответить на вопрос, какими свойствами должен обладать документ, релевантный заданному запросу. Исходя из такой постановки задачи идентификации, на вход системе подается запрос, а на выходе система предоставляет значения значимых факторов.

### Подготовка данных

Факторы, описывающие документ и текстовый запрос, могут быть как числовыми (такие, как объем текста документа), так и номинальными (например, тематика документа). Целью предварительной обработки данных для нейросетевого анализа является приведение данных к однородному виду, которое включает в себя три этапа [14, 16]:

1. Априорное исключение малозначимых компонент векторов  $d$  и  $q$ . На данном этапе проверяется наличие корреляционных связей между характеристиками как входных, так и выходных данных отдельно с последующим исключением малозначимых факторов.
2. Представление входов и выходов в числовом виде для номинальных факторов с помощью двоичного кодирования, при котором каждому значению фактора сопоставляется вектор, компоненты которого соответствуют разрядам двоичного представления номера значения.
3. Нормировка данных с помощью биполярной сигмоидальной функции активации [16]

$$f(x) = \tanh(\beta x),$$

где  $\beta$  – заданный коэффициент;  $x$  – значение фактора.

### Нейросетевые модели

Поисковая система анализирует все известные ей факторы, однако в реальном расчете релеванности используются только наиболее значимые из них [3]. Это делает необходимым проведение факторного анализа данных для выявления значимых факторов. Часто для различных пар  $(q, d)$  алгоритм ранжирования использует различные факторы. В данной работе значимыми считаются факторы, принимающие близкие выходные значения для схожих входных векторов. В качестве входных векторов рассматриваются векторы  $x$  запросов  $q$ , в качестве выходных векторов  $y$  – векторы  $d$  характеристик документа. Также может рассматриваться модель, в которой часть компонент вектора  $d$  входит во входной вектор  $x$ , а оставшаяся часть составляет выходной вектор  $y$ .

Предложенный ниже алгоритм факторного анализа использует сеть Кохонена [14–16] и метод кластеризации k-means [14, 16]. Использование сети Кохонена обуславливается сокращением временных издержек на переобучение и возможностью использования результатов обучения на этапе регрессионного анализа.

**Метод кластеризации k-means** состоит в следующем. Пусть задано множество векторов  $\{x_1, \dots, x_m\} \subseteq E$ ,  $E$  – пространство векторов. Требуется разбить это множество на  $k$  кластеров. Для этого находится множество кластерных центров  $w_j \subseteq E$ ,  $j=1, \dots, k$ , минимизирующих функционал

$$D = \sum_{i,j} d(x_i, w_j),$$

где  $d(x_i, w_j)$  – мера расстояния между векторами  $x_i$  и  $w_j$  в пространстве  $E$ .

Нейронная сеть Кохонена состоит из одного слоя – выходного (рис. 1).

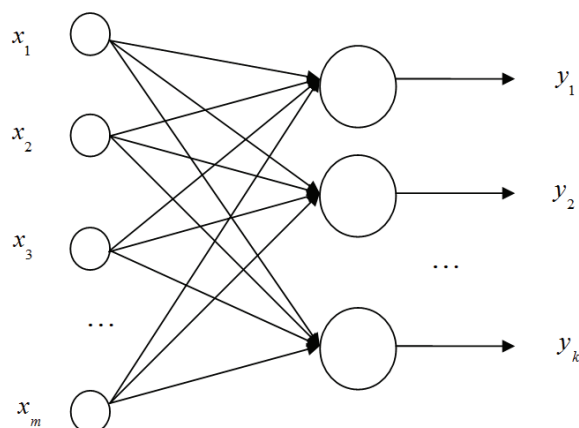


Рис. 1. Архитектура нейронной сети Кохонена

Fig. 1. Architecture of Kohonen neural network

Вектор входных сигналов  $x=(x_1, \dots, x_m)$  поступает на входы всех нейронов выходного слоя. Нейроны выходного слоя являются линейными адаптивными сумматорами и обучаются по правилу WTA (Winner Takes All). Каждому нейрону выходного слоя соответствует некоторый кластер пространства  $E$ .

Обучение сети Кохонена состоит в подборе весов  $w_{ij}$ ,  $i=1 \dots m$ ,  $j=1 \dots k$  нейронов выходного слоя. Веса нейрона, отвечающего за кластер, являются компонентами вектора  $w^j$ , являющегося центром  $j$ -го кластера. Нейрон  $j \in \{1, \dots, k\}$ , победивший при обучении на некотором входном векторе, изменяет свои веса согласно правилу

$$w^j(t+1) = w^j(t) + \eta(x - w^j(t)),$$

где  $w^j$  – вектор весовых коэффициентов нейрона-победителя;  $\eta \in (0, 1)$  – коэффициент обучения;  $x$  – входной вектор. Одновременно с нейроном-победителем с меньшей интенсивностью свои веса меняют и другие нейроны  $i \in \{1, \dots, k\}$ ,  $i \neq j$ . Чем дальше нейрон находится от победителя, тем меньше изменяются его веса:

$$w^i(t+1) = w^i(t) + \eta G(i, j)(x - w^i(t)).$$

Здесь  $G(i, j)$  – функция расстояния между нейроном-победителем  $j$  и данным нейроном  $i$ , например

$$G(i, j) = \exp\left(-\frac{d^2(i, j)}{2\lambda^2}\right),$$

где  $d(i, j)$  – мера расстояния между весовыми векторами нейронов (например,  $d(i, j) = \|w^i - w^j\|$ ),  $\lambda$  – заданный параметр. Выходной сигнал нейрона  $i$  равен  $y_i = G(i, j)$ ,  $i=1, \dots, k$ .

**Алгоритм факторного анализа.** На вход алгоритма поступает множество входных векторов  $q$  и множество выходных векторов  $d$ . Алгоритм факторного анализа состоит из двух шагов:

1. Выполнить многомерную кластеризацию входных векторов  $x$  с помощью сети Кохонена. Ко-

личество  $k$  выходных нейронов (количество кластеров) определить экспериментально, проводя обучение необходимое число раз.

2. Для каждого кластера и каждой компоненты  $y_j$ ,  $j=1, \dots, k$  выходного вектора сети Кохонена провести одномерное разбиение значений  $x$  на два кластера методом  $k$ -means. Исходя из результата разбиения и заданных параметров  $\varepsilon$  и  $p$ , принять решение о значимости характеристики  $y_j$  по следующему правилу: если доля векторов, находящихся в меньшем кластере, превышает  $p \in (0, 1)$ , и

$$\sum_{i,l} d(x^i, w^l) > \varepsilon,$$

где  $w^l$ ,  $l=1, 2$  – центры двух кластеров;  $x^i$  – значения фактора;  $i=1, \dots, N$ ,  $N$  – количество примеров;  $d(x, w)$  – мера близости векторов  $x$  и  $w$ , признать характеристику  $y_j$  незначимой. Использование параметров  $\varepsilon$  и  $p$  позволяет отличать наличие одного кластера от наличия двух близко расположенных кластеров.

По завершении факторного анализа получены:

- 1) разбиение входных векторов  $x$  на  $k$  кластеров и центры  $w^j$ ,  $j=1 \dots k$  этих кластеров;
- 2) обученная сеть Кохонена;
- 3) список значимых характеристик (факторов) для каждого кластера.

**Регрессионный анализ.** В ходе регрессионного анализа требуется получить оптимальные значения значимых характеристик. В качестве модели регрессионного анализа рассмотрены две конструкции, в основе которых лежит многослойный персептрон [14–16].

**Многослойный персептрон.** Каждый нейрон персептрона получает на вход вектор  $x=(x_1, \dots, x_N)$  и генерирует выходной сигнал  $y = f\left(\sum_{i=0}^N w_i x_i\right)$ , где  $w_i$ ,

$i=1 \dots N$  – настраиваемые веса;  $w_0$  – пороговое значение, а  $x_0=1$ . В случае, когда функция  $f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u}}$

(униполярная сигмоидальная функция) или  $f(u) = \tanh(\beta u)$  (биполярная сигмоидальная функция), где  $\beta$  – заданный коэффициент, многослойная нейронная сеть называется сигмоидальной. Такая модель используется в данной работе.

Множество нейронов многослойной нейронной сети разделено на выходной и заданное количество скрытых слоев. Количество входов персептрона, образующих входной слой, и нейронов выходного слоя полностью определяется условием решаемой задачи, в то время как количество нейронов скрытых слоев определяется экспериментально. Нейроны каждого слоя обычно связаны со всеми нейронами соседних слоев. Например, в сигмоидальной сети, представленной на рис. 2, нейроны скрытого слоя связаны со всеми входами сети (входной слой) и всеми нейронами выходного слоя. Сеть является однонаправленной, то есть сигналы передаются от входов сети в направлении к выходным нейронам.

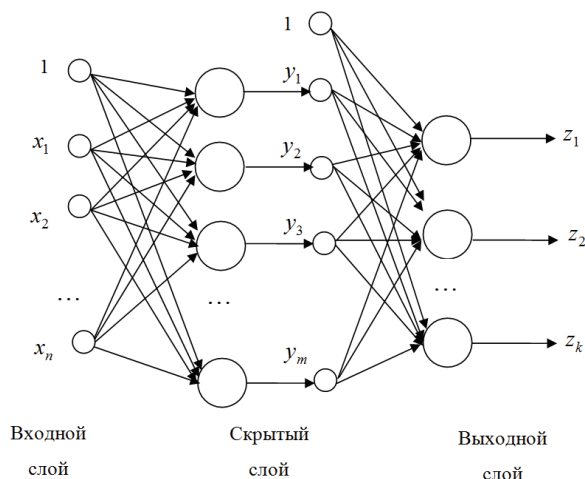


Рис. 2. Сигмоидальная сеть с одним скрытым слоем

Fig. 2. Sigmoid network with one hidden layer

Обучение нейрона сети состоит в подборе весов связей – коэффициентов  $w_i, i=1...N$ . Обучение нейронной сети является задачей оптимизации целевой функции ошибки при варьировании весовых коэффициентов. Функция ошибки может быть задана различными способами, например, среднеквадратичная функция ошибки

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j (z_{ij} - d_{ij})^2,$$

где  $z_{ij}$  – компонента выходного вектора, продуцируемая  $j$ -м выходным нейроном сети в ответ на  $i$ -й входной вектор задачника;  $d_{ij}$  – компоненты целевого вектора для  $i$ -го входного вектора задачника.

Поскольку сигмоидальная функция обладает свойством дифференцируемости, возможно применение градиентных методов обучения. В данной работе используется метод сопряженных градиентов [16]. Начальное значение весов нейронов выбирается случайным образом, начальное направление выбирается как  $s_0 = -\nabla E_0$ , а каждый последующий шаг производится в заданном направлении

$$s_{k+1} = -g_{k+1} + s_k \frac{(g_k - g_{k-1}, g_{k+1})}{(g_k - g_{k-1}, s_{k+1})},$$

где  $g_k = \nabla E_k, k=0,1,...$  – номер итерации. В этом направлении выявляется локальный минимум функции ошибки  $E(w)$ .

**Модель на основе гибридной нейронной сети.** Гибридная сеть является каскадным объединением сети Кохонена и двухслойного персептрона [15]. Самоорганизующаяся сеть Кохонена выделяет значимые факторы во входных векторах. Эти факторы образуют входной слой персептрона (число входов персептрона совпадает с количеством кластеров, выделенных сетью Кохонена). Количество выходных нейронов совпадает с количеством значимых характеристик, где каждая характеристика значима хотя бы для одного кластера. Количество скрытых нейронов определяется экспериментально.

Гибридная сеть обрабатывает все кластеры, но при этом требуется дополнительная модификация задачника, необходимость которой вызвана наличием большого числа факторов, несущественных для некоторых кластеров. Модификация задачника состоит в обнулении тех компонент выходных векторов, которые являются малозначимыми для кластера, соответствующего входному вектору.

Недостаток гибридной нейронной сети состоит в сложности ее обучения. Показано [21], что наличие большого числа нулевых компонент в задачнике влечет усложнение обучения градиентными методами, поскольку на поверхности ошибки нейронной сети, являющейся геометрической интерпретацией функции ошибки, возникают обширные плоские области. Использование гибридной сети оправдано при значительном пересечении множеств значимых характеристик между кластерами.

**Модель на основе комплекса многослойных нейронных сетей.** Для каждого кластера входных векторов, выделенного сетью Кохонена, предлагается использовать отдельный персептрон с одним скрытым слоем. Задачник сети представляет собой множество пар «вход–выход» исходного задачника, где вход принадлежит исследуемому кластеру. Количество входных нейронов персептрона совпадает с количеством нейронов сети Кохонена, количество скрытых нейронов определяется экспериментально, количество выходных нейронов определяется числом значимых факторов исследуемого кластера.

Данная модель позволяет решить проблему нулевых значений в задачнике для гибридной нейронной сети, однако более громоздка, поскольку для каждого кластера создается отдельная аппроксимирующая нейронная сеть. Такая модель оправдана при небольшом количестве значимых характеристик для кластеров или небольшом количестве кластеров.

Алгоритм обучения нейросетевых моделей имеет ряд особенностей:

1. Качество результата каждого этапа (кластерный анализ, факторный анализ, регрессионный анализ) оказывает ключевое влияние на следующий этап.
2. Качество обучения не ухудшается, если число выходных нейронов сети Кохонена превысит количество кластеров входных векторов. Это объясняется тем, что разбиение множества схожих векторов на более мелкие кластеры не влияет негативно на проведение этапа факторного анализа.
3. Если в кластер попадает большая доля неверно распознанных векторов, при использовании модели на основе гибридной нейронной сети значение ошибки в проблемном кластере снижается, что связано с малым количеством значимых характеристик в этом кластере.

Описанные выше особенности позволяют выбрать модель регрессионного анализа на основе результатов кластерного и факторного анализа:

1. В случае выделения большого числа кластеров входных векторов предпочтительнее использование модели на основе гибридной нейронной сети.
2. В случае слабых пересечений наборов значимых характеристик между кластерами предпочтительнее использование модели на основе комплекса многослойных персептронов.
3. В случае выделения большого числа кластеров со слабыми пересечениями наборов значимых характеристик возможно использование модели на основе комплекса гибридных нейронных сетей, в которой каждая гибридная сеть обрабатывает кластеры с сильными пересечениями наборов значимых характеристик.

#### Тестирование алгоритма

В качестве исходного алгоритма ранжирования рассмотрен классический алгоритм OkapiBM25 [20], в котором значение функции релевантности рассчитывается следующим образом:

$$BM25(d, q) = \sum_{t \in q} BM25w_{t,d},$$

где

$$BM25w_{t,d} = idf_t * \frac{(k_1 + 1) f_{t,d}}{k_1 (1 - b + b \frac{dl}{avdl}) + f_{t,d}},$$

$d$  – документ;  $q$  – запрос;  $t$  – леммы запроса;  $dl$  – длина документа;  $avdl$  – средняя длина документов в коллекции;  $f_{t,d}$  – частота леммы  $t$  в документе  $d$ ;  $idf_t$  – обратная частота встречаемости слова  $t$ ;  $k_1=2, b=0,75$ .

Обучающая выборка строится на основе текстовой коллекции РОМИП-2003 и запросов из задания РОМИП-2006 [22]. Из задания РОМИП-2006 отобраны запросы, количество слов которых варьируется от 2 до 5, не включают в себя цифры, слова с печатками, неизвестные слова и при этом в текстовой коллекции содержится не менее 5 документов, включающих все слова запроса. Вектор  $q$  состоит из 11 компонент, часть из которых может быть нулевыми. Первые 5 пар компонент содержат значения  $f_{t,d}$  и  $idf_t$ ,  $t \in q$ , которые являются факторами, описывающими запрос, последняя компонента определяет количество слов запроса.

Входными векторами задачника являются векторы параметров запросов  $q$ , выходными – векторы  $d$  параметров документов, получивших 1 ранг при ранжировании по алгоритму OkapiBM25. Вектор  $d$  содержит значения  $f_{t,d}$  и  $dl$ , длина вектора  $d$  равна 6. В задачник вошел 141 запрос длины 2, 158 запросов длины 3, 157 запросов длины 4 и 133 запроса длины 5. 80 % векторов использованы в качестве обучающих, а 20 % – в качестве тестовых.

В качестве функции ошибки использована функция

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (y_{i,j} - d_{i,j})^2,$$

где  $N$  – количество примеров;  $M$  – размерность выходных векторов;  $y_{i,j}$  – компоненты выходного вектора нейронной сети;  $d_{i,j}$  – компоненты ожидаемого выходного вектора.

Количество нейронов сети Кохонена (количество выделяемых сетью кластеров) наращивалось, начиная с двух, до 8, исходя из качества работы гибридной сети или комплекса сетей. В качестве критерия качества использовалась ошибка обучения. Дальнейшее увеличение числа нейронов не приводит к улучшению качества работы сети, но приводит к увеличению объема вычислений.

В ходе предварительной обработки данных исключена компонента, соответствующая количеству слов запроса, поскольку она является линейной комбинацией 5 других компонент. В результате факторного анализа входные векторы разделились на кластеры по количеству слов в запросе. Оптимальное разбиение получено при использовании 8 нейронов в слое Кохонена: 2 кластера соответствовали длине запроса 2, 2 кластера соответствовали длине запроса 3, 2 кластера – длине запроса 4 и 2 кластера длине запроса 5. Для каждого кластера в качестве значимых факторов определены  $f_{t,d}$  и  $dl$ , где  $t \in q$  для большей доли документов. Размер доли определяется параметрами  $\varepsilon$  и  $p$ . В исследовании использованы значения  $\varepsilon=0,01$  и  $p=0,25$ , что соответствует 75% -й доле. В скрытом слое персептрона гибридной сети использовалось 16 нейронов, в скрытых слоях комплекса персептронов использовалось 8 нейронов.

**Таблица 1.** Результаты обучения модели на основе гибридной сети

**Table 1.** Results of model learning based on hybrid network

Номер кластера Cluster no.	Размер кластера (обучающие данные) Cluster size (learning data)	Ошибка на обучающих данных Error on learning data	Доля неверных ответов Part of wrong answers
1	51	0,0001	0
2	63	0,0001	
3	58	0	
4	61		
5	64	0,0533	0,03125
6	50	0,0003	0
7	60	0,0002	0,01667
8	63	0,0001	0

Ответом обученной нейронной сети на входной вектор запроса являются значения компонент вектора  $d$ , которые обеспечат высокий ранг документа по данному запросу. Ответ нейронной сети считается неверным, если релевантность документа ниже, чем у векторов-документов задачника.

В табл. 1 и 2 представлены ошибки, полученные на обучающих и тестовых данных (доля неверных ответов), на восьми различных кластерах, выделенных сетью Кохонена. Результаты тестирования алгоритма показывают успешное обучение моделей и низкие значения ошибок обучения и тестирования.



**Таблица 2.** Результаты обучения модели на основе комплекса многослойных персептронов**Table 2.** Results of model learning based on complex of multilayered perceptrons

Номер кластера Cluster no.	Размер кластера (обучающие данные) Cluster size (learning data)	Ошибка на обучающих данных Error on learning data	Доля неверных ответов Part of wrong answers
1	51	0,000189	0,0589
2	63	0,0001	0,0476
3	58	0,00062	0
4	61	0,0002	
5	64	0,00017	
6	50	0,0001	
7	60	0,0001	0,01667
8	63	0,0001	0,01589

### Заключение

Предложен алгоритм идентификации систем текстового поиска в базах данных систем геомониторинга, включающий факторный и регрессионный анализ данных. Факторный анализ включает кластеризацию данных на основе использования

сети Кохонена. Для проведения регрессионного анализа предлагается использовать одну из двух нейросетевых моделей: на основе гибридной нейронной сети или на основе комплекса многослойных персептронов. Результаты тестирования алгоритма показывают успешное обучение моделей и низкие значения ошибок обучения и тестирования. При этом модель на основе гибридной нейронной сети имеет сложности в обучении при наличии большого числа непересекающихся значимых характеристик.

Наиболее узким местом алгоритма является метод факторного анализа, позволяющий выделить значимые факторы. Кроме предложенного статистического метода, выделяющего наиболее важные факторы, возможно применение сети Байеса [23] или методов нечеткой логики [24]. Следующим шагом в данной разработке может стать анализ влияния сложных факторов, являющихся нелинейной комбинацией измеряемых характеристик. Также возможны модификации моделей введением веса значимости характеристики, влияющего на обучение нейросетевых моделей и интерпретацию результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «ГЕОМОНИТОРИНГ» – Интернет-сайт состояния геологической среды Российской Федерации. URL: <http://www.gisinfo.ru/projects/18.htm> (дата обращения: 26.05.2014).
2. Baeza-Yates R., Ribeiro-Neto B. Modern Information Retrieval: The Concepts and Technology behind Search. 2<sup>nd</sup> edn. – USA: Addison Wesley Professional, 2011. – 913 p.
3. Гулин А., Карпович П. Жадные алгоритмы в задачах оптимизации качества ранжирования. – 2009. URL: [http://download.yandex.ru/company/experience/GDD/Zadnie\\_algoritmy\\_Karpovich.pdf](http://download.yandex.ru/company/experience/GDD/Zadnie_algoritmy_Karpovich.pdf) (дата обращения: 13.08.2014).
4. Large scale machine learning systems and methods / J. Bemb, G.R. Harik, J.L. Levenberg, N. Shazeer, S. Tong. – 2013. URL: <http://www.google.com/patents/US8688705> (дата обращения: 13.08.2014).
5. Liu T.Y. Learning to rank for information retrieval. – Berlin: Springer, 2011. – 288 p.
6. Pintelon R., Schoukens J. System identification: a frequency domain approach. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 788 p.
7. Ашманов И., Иванов А. Оптимизация и продвижение сайтов в поисковых системах. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 464 с.
8. Дистанционное зондирование Земли. URL: <http://www.spacecorp.ru/directions/sensing/> (дата обращения: 13.08.2014).
9. Зябрев И., Пожарков О. Статистические методы исследования алгоритмов текстового ранжирования поисковых систем. – 2009. URL: <http://www.altertrader.com/publications18.html> (дата обращения: 13.08.2014).
10. Гулин А., Маслов М., Сегалович И. Алгоритм текстового ранжирования Яндекса на РОМИП-2006 // Труды четвертого российского семинара РОМИП-2006. – СПб.: НУ ЦСИ, 2006. – С. 40–51.
11. Зябрев И., Пожарков О., Пожаркова И. Алгоритм отбора максимально эффективного множества доноров для продвижения сайта в поисковых системах. – 2011. URL: <http://www.altertrader.com/publications25.html> (дата обращения: 13.08.2014).
12. Зябрев И., Пожарков О., Пожаркова И. Реализация и анализ эффективности метода построения оптимального множества доноров для продвижения сайта в поисковых системах. – 2011. URL: <http://www.altertrader.com/publications31.html> (дата обращения: 13.08.2014).
13. Зябрев И., Пожарков О., Пожаркова И. Моделирование алгоритма текстового ранжирования Яндекса при помощи Matrix-Net. – 2012. URL: <http://www.altertrader.com/publications21.html> (дата обращения: 13.08.2014).
14. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютеринг и его применения в экономике и бизнесе. – М.: ИНТУИТ, БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. – 222 с.
15. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
16. Тарков М.С. Нейрокомпьютерные системы. – М.: ИНТУИТ, БИНОМ, Лаборатория знаний, 2006. – 140 с.
17. Bidyadhar S., Debashisha J. A differential evolution based neural network approach to nonlinear system identification // Applied Soft Computing. – 2011. – V. 11. – Iss. 1. – P. 861–871.
18. Self-Organising Maps in Document Classification: a Comparison with Six Machine Learning Methods / J. Saarikoski, J. Laurikkala, K. Järvelin, M. Juhola // Adaptive and Natural Computing Algorithms Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – V. 6593. – С. 260–269.
19. Han J., Kamber M., Pei J. Data mining: concepts and techniques. 3<sup>rd</sup> ed. – Burlington: Elsevier Inc, 2012. – 703 p.
20. Upstill T.G. Document ranking using web evidence. PhD thesis. – Canberra, 2005. – 228 с.
21. Kordos M., Duch W. A survey of factors influencing MLP error surface // Control and Cybernetics. – 2004. – V. 33. – № 4. – P. 611–631.
22. Российский семинар по оценке методов информационного поиска (РОМИП). Текстовая коллекция РОМИП-2003 и запросы из задания РОМИП-2006. URL: <http://romip.ru/> (дата обращения: 13.08.2014).
23. Терехов С.А. Введение в байесовы сети // Нейроинформатика-2003: V Всеросс. науч.-техн. конф. Лекции по нейроинформатике. Ч. 1. – М.: МИФИ, 2003. – С. 149–187.
24. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

Поступила 30.10.2014 г.

UDC 004.89

## REGRESSION ANALYSIS OF GEOMONITORING SYSTEMS DATABASE TEXT RANKING ALGORITHM USING NEURAL NETWORKS

Mikhail S. Tarkov,

A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS,  
13, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: tarkov@isp.nsc.ru

Oyuna A. Kozhushko,

Novosibirsk State University, 2, Pirogova Street,  
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: oyuna@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to investigate the behavior of test ranking algorithms. The practical value of the research consists in searching for engines developers including the solution of problems of recognition and adaptive classification of objects according to satellite geomonitoring systems.

**The main aim of the study** is to investigate a neural network model of the geomonitoring database text documents ranking algorithm. The model is built on the basis of Kohonen network, multilayer perceptrons, and k-means clustering method.

**The methods used in the study:** software implementation and testing of the neural network ranking algorithms by comparing their work results with the results of the classical ranking algorithm OkapiBm25.

**The results.** The authors have proposed the algorithm, built on the basis of the neural network models of data processing and comprising factor and regression analysis, for geomonitoring database text retrieval systems identification. Factor analysis includes data clustering based on the use of Kohonen network. To simplify the learning, the factor analysis algorithm is developed to eliminate the characteristics irrelevant to rank. The result of the models operation is a set of important ranking characteristics and their optimal values. To perform a regression analysis, it is proposed to use one of two neural network models based on a hybrid neural network or a multilayer perceptrons complex. The regression analysis model is selected on the base of the cluster and factor analysis results. In the case of allocating a large number of the input vectors clusters, a neural network hybrid model is preferable. In the case of the weak intersections between the clusters sets of the significant characteristics, a model based on a set of multilayer perceptrons is preferable. The algorithm testing results show the successful models learning and the low training and testing error values. The proposed models are approved on the OkapiBm25 algorithm's test data, and their application peculiarities are identified depending on the input data characteristics.

### Key words:

Geomonitoring systems databases, text ranking algorithm, regression analysis, factor analysis, classification, clustering, neural networks, Kohonen network, multilayer perceptron.

### REFERENCES

1. GEOMONITORING – Internet-sait sostoyaniya geologicheskoy sredy Rossiyskoy federatsii [GEOMONITORING – Internet Site of the Geological Environment of the Russian Federation]. Available at: <http://www.gisinfo.ru/projects/18.htm> (accessed 26 May 2014).
2. Baeza-Yates R., Ribeiro-Neto B. *Modern Information Retrieval: the Concepts and Technology behind Search*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, Addison Wesley Professional, 2011. 913 p.
3. Gulin A., Karpovich P. *Zhadnye algoritmy v zadachakh optimizatsii kachestva ranzhirovaniya* [Greedy function optimization in learning to rank]. 2009. Available at: [http://download.yandex.ru/company/experience/GDD/Zadnie\\_algoritmy\\_Karpovich.pdf](http://download.yandex.ru/company/experience/GDD/Zadnie_algoritmy_Karpovich.pdf) (accessed 13 August 2014).
4. Bem J., Harik G. R., Levenberg J. L., Shazeer N., Tong S. *Large scale machine learning systems and methods*. 2013. Available at: <http://www.google.com/patents/US8688705> (accessed 13 August 2014).
5. Liu T.Y. *Learning to rank for information retrieval*. Berlin, Springer, 2011. 288 p.
6. Pintelon R., Schoukens J. *System identification: a frequency domain approach*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2012. 788 p.
7. Ashmanov I., Ivanov A. *Optimizatsiya i prodvizhenie saytov v poiskovykh sistemakh* [Optimization and Website Promotion in Search Engines]. St-Petersburg, Piter Publ., 2011. 464 p.
8. *Distantsionnoe zondirovanie Zemli* [Remote sensing]. Available at: <http://www.spacecorp.ru/directions/sensing/> (accessed 13 August 2014).
9. Zyabrev I., Pozharkov O. *Statisticheskie metody issledovaniya algoritmov tekstovogo ranzhirovaniya poiskovykh sistem* [Statistical methods for investigating text ranking algorithms of search engines]. 2009. Available at: <http://www.altertrader.com/publications18.html> (accessed 13 August 2014).
10. Gulin A., Maslov M., Segalovich I. *Algoritm tekstovogo ranzhirovaniya Yandeks na ROMIP-2006* [Text ranking algorithm of Yandex on ROMIP-2006]. *Trudy chetvertogo rossiyskogo seminar ROMIP'2006* [Proc. of the fourth Russian seminar ROMIP'2006]. St-Petersburg, Scientific institution «Center for Strategic Studies», 2006. pp. 40–51.
11. Zyabrev I., Pozharkov O., Pozharkova I. *Algoritm othora maksimalno effektivnogo mnozhestva donorov dlya prodvizheniya saytov v poiskovykh sistemakh* [Algorithm of selection of the most effective set of donors for website promotion in search engines]. 2011. Available at: <http://www.altertrader.com/publications25.html> (accessed 13 August 2014).
12. Zyabrev I., Pozharkov O., Pozharkova I. *Realizatsiya i analiz effektivnosti metoda postroeniya optimalnogo mnozhestva donorov dlya prodvizheniya sayta v poiskovykh sistemakh* [Implementation and analysis of the effectiveness of the method of constructing the optimal set of donors for the website promotion in the search engines]. 2011. Available at: <http://www.altertrader.com/publications31.html> (accessed 13 August 2014).
13. Zyabrev I., Pozharkov O., Pozharkova I. *Modelirovanie algoritma tekstovogo ranzhirovaniya Yandeksa pri pomoshchi MatrixNet* [Modeling algorithm of Yandex text ranking using MatrixNet]. 2012. Available at: <http://www.altertrader.com/publications21.html> (accessed 13 August 2014).
14. Ezhov A.A., Shumskiy S.A. *Neyrokomputing i ego primeneniya v ekonomike i biznese* [Neurocomputing and its applications in Eco-

- nomics and business]. Moscow, INTUIT, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 222 p.
15. Osovskiy S. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p.
  16. Tarkov M.S. *Neyrokomp'yuternye sistemy* [Neurocomputer systems]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2006. 140 p.
  17. Bidyadhar S., Debashisha J. A differential evolution based neural network approach to nonlinear system identification. *Applied Soft Computing*, 2011, vol. 11, Iss. 1, pp. 861–871.
  18. Saarikoski J., Laurikkala J., Järvelin K., Juhola M. Self-Organizing Maps in Document Classification: A Comparison with Six Machine Learning Methods. *Adaptive and Natural Computing Algorithms Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 6593, pp. 260–269.
  19. Han J., Kamber M., Pei J. *Data mining: concepts and techniques*. 3<sup>rd</sup> ed. Burlington, Elsevier Inc, 2012. 703 p.
  20. Upstill T.G. *Document ranking using web evidence*. PhD thesis. Canberra, 2005. 228 p.
  21. Kordos M., Duch W. A survey of factors influencing MLP error surface. *Control and Cybernetics*, 2004, vol. 33, no. 4, pp. 611–631.
  22. *Rossiyskiy seminar po otsenke metodov informatsionnogo poiska (ROMIP). Tekstovaya kolleksiya ROMIP-2003 i zaprosy iz zadaniya ROMIP-2006* [Russian Information Retrieval Evaluation Seminar (ROMIP). Text collection ROMIP-2003 and requests from the task of ROMIP-2006]. Available at: <http://romip.ru/> (accessed 13 August 2014).
  23. Terekhov S.A. Vvedenie v bayesovy seti [Introduction into Bayesian Networks]. V *Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Neuroinformatika-2003». Lektsii po neuroinformatike. Glava 1* [V Russian Science and Technology Conference. Neuroinformatics-2003. Lectures on neuroinformatics. Ch. 1]. Moscow, MIFI Press, 2003. pp. 149–187.
  24. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 452 p.

Received: 30 October 2014.

УДК 550.849

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ПИОНЕР» АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Ляпунов Михаил Юрьевич,

аспирант кафедры геологии и природопользования инженерно-физического факультета ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет», Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатъевское шоссе, д. 21. E-mail: lyapunov@pokrmine.ru

*Для успешного функционирования разрабатываемых месторождений полезных ископаемых и принятия при этом практических рекомендаций крайне необходимо проведение комплексных экологических мероприятий. Эти условия могут быть приемлемыми, если будет получена достоверная информация о современном состоянии окружающей природной среды, как в целом, так и ее компонентов. При решении экологических проблем локального характера наиболее уязвимыми становятся те геосистемы, которые наиболее подвержены антропогенным нарушениям, связанным с горнорудным производством. Изучение золоторудного месторождения «Пионер» связано с прогнозной оценкой вредного влияния горных работ на окружающую среду. Для выполнения этих работ требуется объективная информация геозекологического состояния месторождения.*

**Цель работы:** исследование современного эколого-геохимического состояния поверхностных вод в пределах золоторудного месторождения «Пионер».

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический, статистический, ландшафтно-экологический анализ, атомно-абсорбционный, атомно-эмиссионный и масс-спектральный, анализ литературных и фондовых материалов.

**Результаты.** По результатам геозекологических исследований территории золоторудного месторождения «Пионер» выполнена оценка состояния поверхностных вод. По обработанным результатам анализов водных проб по каждому элементу рассчитаны коэффициенты концентраций, выполнен расчет суммарного показателя загрязнения вод по классам 1–2, 3–4, произведена оценка по градациям степени загрязнения (допустимая, умеренно опасная, опасная, чрезвычайно опасная). По результатам обработки данных построена карта результатов гидрохимического опробования поверхностных вод. Поверхностные воды на исследуемой площади загрязнены повсеместно и по суммарному загрязнению характеризуются от умеренно опасной до чрезвычайно опасной степени. В основном загрязнение создают следующие химические элементы и соединения: железо, марганец, алюминий, литий, окисляемость, цветность и из элементов 1 класса опасности – ртуть. Повышенные содержания железа, марганца, алюминия, лития, органики, цветности обусловлены природной геохимической и гидрохимической обстановкой. Наличие заболоченности, торфов и, как следствие, окислительных гидрохимических условий, способствует их повышенной концентрации.

### **Ключевые слова:**

Эколого-геохимические исследования, коэффициент концентрации, золоторудное месторождение, поверхностные воды, предельно допустимая концентрация, химический элемент.

### **Введение**

Амурская область обладает значительными запасами водных ресурсов, существенная часть которых представлена малыми озерами, а также малыми реками и водохранилищами, созданными на них [1].

Малые реки имеют важное ландшафтно-экологическое значение. Они регулируют микроклимат, обеспечивают меженное питание крупных рек. Малые реки Амурской области изучаются по гидрохимическим показателям [2–5]. На малые реки Амурской области оказывают влияние горнодобывающая промышленность, ЖКХ, урбанизация, отрасли сельского хозяйства [6].

Солевой состав природных поверхностных вод достаточно разнообразен и главным образом зависит от климатической зоны их распространения. Однако даже среди водоемов одной территории на солевой состав вод влияет степень проточности водоема, происхождение котловины, тип питания и степень антропогенной нагрузки. Солевой состав является базовым показателем для характеристики условий функционирования водных экосистем. Исследования гидрохимических параметров малых водоемов Амурской области представлены в ряде работ [7–11].

В данной статье рассмотрены гидрохимические исследования поверхностных вод в пределах золоторудного месторождения «Пионер».

Наиболее крупной водной артерией участка «Пионер» является р. Улунга, огибающая его с запада по северной границе и уходящая на юго-восток. Река имеет хорошо выработанную широкую, часто заболоченную, долину с озерами. Для реки характерно большое количество притоков (левых и правых). Наиболее крупные притоки: р. Медвежий, Алкаган, Чесноковский. Некоторые притоки в заболоченной (или заторфовой) части долины имеют нечеткие русла, расчлененные. Долина реки Улунга интенсивно переработана при добыче россыпного золота, гидрологический режим водотока нарушен, некоторые притоки практически не существуют или соответствуют какой-то доле первоначального состояния (руч. Восточный, руч. Бахмут и др.).

Для оценки состояния поверхностных вод с учетом установленных норм качества воды и выявления тенденций изменения уровня загрязненности нами выполнены работы в соответствии с методическими указаниями РД 52.24.309–92 [12].

Водные пробы отбирались на следующие виды исследований: полный химический анализ, фено-

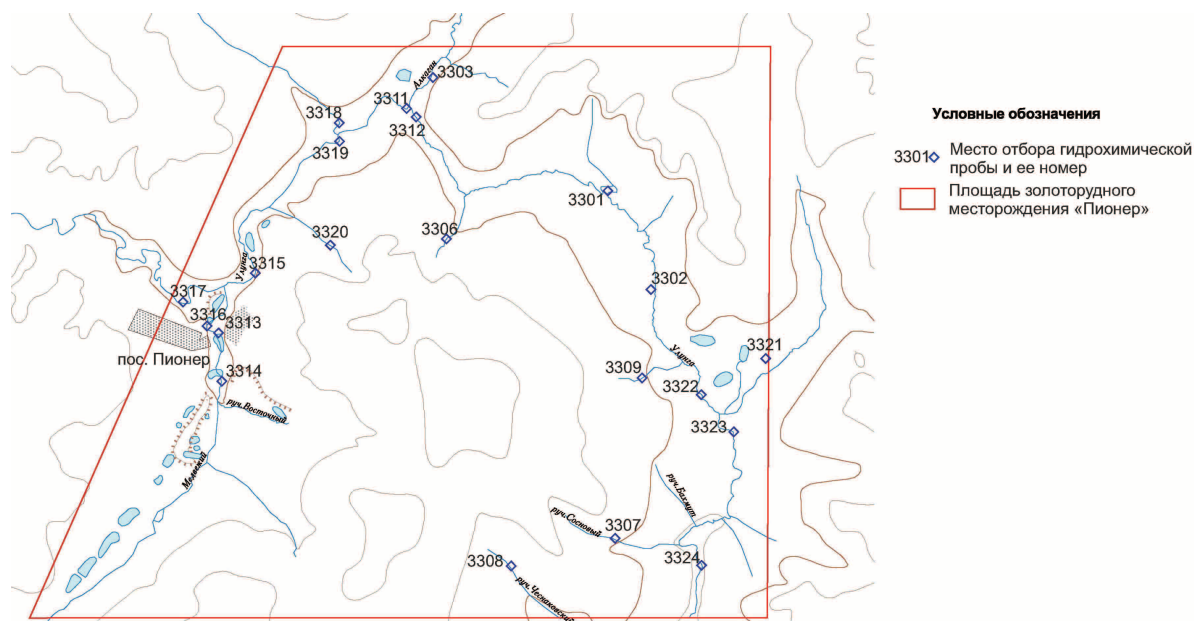


Рис. 1. Схема отбора проб поверхностных вод

Fig. 1. Diagram of surface water sampling

лы, нефтепродукты, СПАВ, БПК-5, взвешенные вещества, кремний, железо, растворенный кислород, микроэлементный состав.

Гидрохимическое опробование водотоков выполнено методом маршрутов с шагом опробования 2 км (т. е. 1 пункт на 4 км<sup>2</sup>). Из поверхностных водотоков выполнено опробование по всей исследуемой площади и режимное опробование (1 раз в месяц) на двух створах реки Улунги. Всего из поверхностных водотоков отобрана 21 проба и на 2-х режимных створах – 12. Всего опробование выполнено на 23 пунктах: р. Улунга – 12 пунктов, левые притоки – 3 пункта, правые притоки – 8 пунктов (рис. 1).

Пробы отбирались согласно руководству ИСО-5667-2 по методам отбора проб для получения аналитических данных, необходимых для контроля качества, характеристик качества и идентификации источников загрязнения. Пробы отобраны с учетом общих требований ГОСТ Р 51592 – 2000 к консервации и хранению.

Водные пробы проанализированы на полный химический анализ, на содержание нефтепродуктов, фенолов, СПАВ, взвешенных веществ, растворенного кислорода, биохимическое поглощение кислорода (БПК-5), полифосфатов, ортофосфатов, кремния, железа в ЦАЛ ФГУП «Амургеология», на микрокомпонентный состав на 72 элемента (атомно-эмиссионный и масс-спектральный метод) в АСИЦ ИПТМ РАН в п. Черноголовка.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Оценка качества поверхностных вод выполнена в соответствии с Приказом Росрыболовства от 18.01.2010 № 20 «Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том

числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [13].

Выявление уже сформировавшихся зон чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия осуществляются по химическим и экологическим показателям [14–17].

В первую очередь в качестве основных показателей оценки состояния поверхностных вод выбраны токсичные, приоритетные загрязняющие вещества, в том числе обладающие кумулятивными свойствами накапливаться в органах и тканях гидробионтов. В дополнительные показатели включены общепринятые физико-химические характеристики, дающие общее представление о составе и качестве вод. Эти показатели используются для дополнительной характеристики процессов, происходящих в водных объектах.

Критерии оценки химического загрязнения поверхностных вод представлены в табл. 1.

По обработанным результатам анализов водных проб для каждого элемента рассчитаны коэффициенты концентраций, выполнен расчет суммарного показателя загрязнения вод по классам, выполнена оценка по градациям степени загрязнения (допустимая, умеренно опасная, опасная, чрезвычайно опасная).

Опробование поверхностных вод было выполнено по всей исследуемой площади: р. Улунга и ее притоки и режимное на 2-х створах, расположенных на р. Улунга. Всего на площади отобрана 21 проба и на 2-х режимных створах – 12 проб.

Левые притоки р. Улунга (р. Алкаган, и ручей Безьянный) дренируют площадь, не входящую в пределы участка «Пионер». Они имеют заболоченные

**Таблица 1.** Критерии оценки химического загрязнения поверхностных вод**Table 1.** Criteria for estimating chemical pollution of surface waters

Показатели (химические вещества) Indices (chemical substances)	Загрязнение/Pollution			
	Допустимое Tolerable	Умеренно опасное Moderately	Опасное Dangerous	Чрезвычайно опасное Highly dangerous
1–2 класс опасности 1–2 hazard class	1 ед. ПДК 1 unit MPC	1–5 ед. ПДК 1–5 unit MPC	5–10 ед. ПДК 5–10 unit MPC	Более 10 ед. ПДК More than 10 unit MPC
3–4 класс опасности 3–4 hazard class	1 ед. ПДК 1 unit MPC	1–50 ед. ПДК 1–50 unit MPC	50–100 ед. ПДК 50–100 unit MPC	Более 100 ед. ПДК More than 100 unit MPC
Дополнительные показатели: реакция среды Additional indices: environmental reaction	6,0–9,0		5,7–6,5	5,0–5,6
Отношение к ПДК: Ratio to maximum permissible concentration нитриты/nitrites	Менее 1 Less than 1	1–5	5–10	Более 10 More than 10
нитраты/nitrates		1–10	10–20	Более 20 More than 20
Растворенный кислород, процент насыщения Dissolved oxygen, saturation percentage	Более 80 More than 80	50–80	20–50	Менее 20 Less than 20
Фосфаты (PO <sub>4</sub> ), мг/кг Phosphates (PO <sub>4</sub> ), mg/kg	Менее 0,5 Less than 0,5	0,05–0,3	0,3–0,6	Более 0,6 More than 0,6

ПДК – предельно допустимая концентрация.

MPC – maximum permissible concentration.

широкие долины, обладают непостоянным водным режимом со скоростью течения 0,3–0,5 м/с.

Поверхностные воды левых притоков р. Улунга по составу гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые с минерализацией 0,05–0,08 г/л, очень мягкие (общая жесткость 0,5–1,0 мг-экв/л), слабокислые, нейтральные (величина pH 5,8–7,1).

Для них характерно повышенное содержание относительно ПДК следующих элементов: Fe (0,9–1,9 мг/л, Кк 9–19), Mn (0,046–0,32 мг/л, Кк 4,6–32,6), F (0,1–0,4 мг/л, Кк 2,0–8,0), цветности (142–220 град., Кк 7,1–11,0), Al (0,1–0,42 мг/л, Кк 2,5–10,5), Li (0,03 мг/л, Кк 4,3), органики по окисляемости перманганатной (18–28 мг/л, Кк 3,6–5,6). Cu (0,0014 мг/л, Кк 1,4) – р. Алкаган; мутности (4,8 мг/л, Кк 3,2) – ручей пади Безымянная. Содержания остальных показателей химического состава воды соответствуют установленным нормативам [13].

Правые притоки р. Улунга (р. Медвежий, Соновый, Чесноковский, Звездный и 2-х малых безымянных притоков) находятся непосредственно на площади участка «Пионер». Долина р. Медвежий практически вся перемыта при отработке россыпи и заболочена, с большим количеством озер. Малые притоки имеют плохо выработанные заболоченные долины.

Поверхностные воды правых притоков р. Улунга по составу сульфатные, гидрокарбонатно-сульфатные, реже гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,1–0,45 г/л, умеренно жесткие и жесткие, реже мягкие (общая жесткость 1,5, 3,9–8,2 мг-экв/л), нейтральные (величина pH 6,1–7,6).

Воды, по сравнению с установленными нормативами [9], характеризуются повышенным содер-

жанием Fe (0,3–2,3 мг/л, Кк 3–23), Mn (0,035–0,73 мг/л, Кк 3,5–73), Li (0,002–0,01 мг/л, Кк 2,9–18,6), Al (0,08–0,72 мг/л, Кк 2–18), Cu (0,0032–0,0037 мг/л, Кк 3,2–3,7), V (0,0015–0,0024 мг/л, Кк 1,5–2,4), S (39–83 мг/л, Кк 3,9–8,3), F (0,1–0,2 мг/л, Кк 2–4), цветности (58–106 град., Кк 2,9–5,3), органики по окисляемости (10–50,5 мг/л, 2–10,1), сульфатов (160–240 мг/л, Кк 1,6–2,4) и в единичных водотоках – жесткости общей (8,4 мг-экв/л, Кк 1,2), Si (12 мг/л, Кк 1,2), Mo (0,002 мг/л, Кк 1,5), нитритов (0,2 мг/л, Кк 2,3), аммония (0,7 мг/л, Кк 1,4).

Поверхностные воды р. Улунга по составу гидрокарбонатные, редко сульфатно-гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые с минерализацией 0,07–0,11 г/л, очень мягкие (общая жесткость 0,5–1,5 мг-экв/л), нейтральные (величина pH 6,2–7,8).

Для них характерно повышенное содержание: Fe (1,1–6,8 мг/л, Кк 11–68), Mn (0,057–0,36 мг/л, Кк 5,7–36), F (0,1–3,0 мг/л, Кк 2–6), Li (0,002–0,004 мг/л, Кк 2,9–5,7), Al (0,08–0,7 мг/л, Кк 2–16,8), Cu (0,0016–0,0057 мг/л, Кк 1,6–5,7), V (0,0014–0,0016 мг/л, Кк 1,4–1,6), цветности (82–540 град., Кк 4,1–27), органики по окисляемости 16,5–25 мг/л, Кк 3,3–5), мутности (2,4–3 мг/л, Кк 1,6–2); фенолов (0,0017 мг/л, Кк 1,7), взвешенных веществ (34,5–153 мг/л, Кк 2,3–10,2), Hg (0,000081–0,00015 мг/л, Кк 8,1–15).

По величине водородного показателя, согласно критериям оценки химического загрязнения, поверхностные воды участка имеют преимущественно допустимую (pH 6,6–7,6) степень концентрации. На 4-х пунктах опробования воды имеют опасную (pH 5,8–6,3) и на одном чрезвычайно опасную (pH 5,5) степень концентрации водородного показателя.

**Таблица 2.** Средний химический состав поверхностных вод в пределах золоторудного месторождения «Пионер»

**Table 2.** Average chemical composition of surface water within gold field «Pioneer»

Показатель Index	ПДК/МРС	min	max	Количество проб, N Number of samples, N
pH	6,5–8,5	5,5	7,6	34
$\chi$ , МС/см (mS/cm)	400	18	615	34
мг/дм <sup>3</sup> (mg/dm <sup>3</sup> )				
Ca <sup>2+</sup>	180	6,41	88,18	34
Mg <sup>2+</sup>	40	1,22	46,21	34
Na <sup>+</sup>	120	2,50	8,20	34
K <sup>+</sup>	50	0,70	6,50	34
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		14,64	183,0	34
Cl <sup>-</sup>	300	1,86	5,95	34
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	100	0,45	241,5	34
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	40	0,05	22,0	34
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,08	0,0015	0,18	34
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,5	0,025	0,74	34
мкг/дм <sup>3</sup> (mkg/dm <sup>3</sup> )				
Fe	100	60,6	2238,37	34
Al	40	8,42	719,75	34
Mn	10	0,30	725,64	34
Zn	10	0,47	80,21	34
Cu	1,0	0,27	8,98	34
Pb	100	0,04	4,06	34
Cd	5,0	0,01	0,25	34
As	50	0,90	30,42	34
Co	10	0,12	8,34	34
Ni	10	0,54	7,90	34
Hg	0,01	0,02	0,14	34

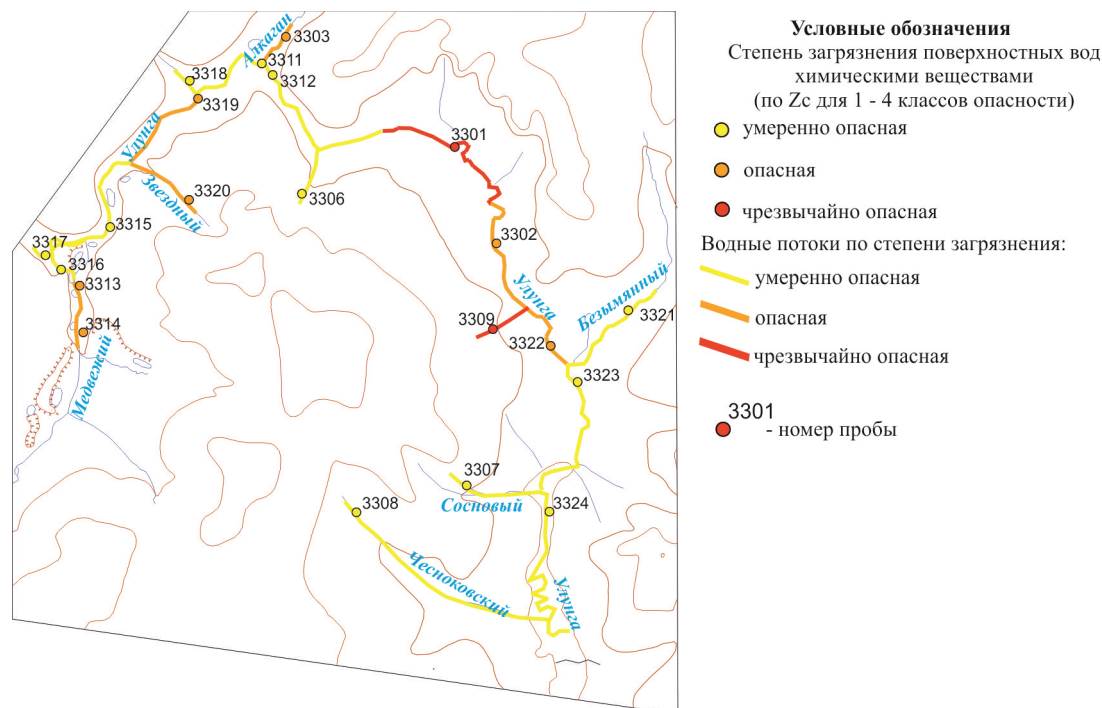
Существенного изменения химического состава воды относительно времени (паводок, межень) на режимных створах не наблюдается, состав постоянен, концентрация элементов меняется в очень малых пределах.

В целом экологическое состояние поверхностных вод участка «Пионер» по критериям оценки химического загрязнения [14], по показателю суммарного загрязнения для элементов 1–4 классов опасности оценивается как умеренно опасное, опасное и реже чрезвычайно опасное.

Концентрации элементов 1, 2 классов опасности создают следующие степени загрязнения: в одном пункте (р. Улунга – т.н. 3301) чрезвычайно опасная (Кк Hg 15), в одном пункте (р. Улунга – т.н. 3302) опасная (Кк Hg 10), в одном пункте (правый приток р. Улунга) умеренно опасная (Кк нитритов 2,3), в остальных пунктах допустимая степень загрязнения.

Концентрации элементов 3, 4 классов опасности создают следующую экологическую обстановку. В двух пунктах (р. Улунга – т.н. 3301 и правый приток р. Улунга) чрезвычайно опасная степень загрязнения (Zc > 100), в 9 пунктах (р. Улунга – т.н. 3302, р. Улунга, правые притоки р. Улунга и устье р. Алкаган) опасная (Zc от 50 до 100) и на остальных 12 пунктах (р. Улунга, правые и левые притоки р. Улунга) умеренно опасная (Zc от 1 до 50) степень загрязнения.

Повышенные содержания железа и марганца характерны для природных вод Дальневосточного региона, повышенные содержания алюминия и лития свойственны для пресных вод окислитель-



**Рис. 2.** Степень загрязнения поверхностных вод химическими веществами

**Fig. 2.** Degree of surface waters contamination with chemical substances

ной обстановки, где их источником являются горные породы и рыхлые отложения.

По полученным результатам построена карта степени загрязнения поверхностных вод химическими веществами (рис. 2) [18].

#### Заключение

По результатам исследования современного эколого-геохимического состояния поверхностных вод в пределах золоторудного месторождения «Пионер» можно сделать вывод, что поверхностные воды на исследуемой площади загрязнены повсеместно и по

суммарному загрязнению характеризуются от умеренно опасной до чрезвычайно опасной степени. В основном загрязнение создают следующие химические элементы и соединения: железо, марганец, алюминий, литий, окисляемость, цветность и из элементов 1 класса опасности – ртуть. Повышенные содержания железа, марганца, алюминия, лития, органики, цветности обусловлены природной геохимической и гидрохимической обстановкой. Наличие заболоченности, торфов и, как следствие, окислительных гидрохимических условий, способствует их повышенной концентрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амурская область: водные ресурсы и основы региональной водохозяйственной деятельности / под ред. В.Н. Заслоновского. – Екатеринбург; Чита: Изд-во РосНИИВХ, 2005. – 103 с.
2. Платонова Т.П., Пакулина А.П., Бондалет А.В. Оценка экологического состояния малых рек Амуро-Зейской равнины // Естественные и технические науки. – 2012. – № 2. – С. 113–118.
3. Пакулина А.П., Платонова Т.П. Содержание органического вещества в водных экосистемах как показатель их экологического состояния // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2012. – № 9. – С. 86–90.
4. Платонова Т.П., Пакулина А.П. Эколого-химическая оценка качества вод озера агроландшафта (на примере оз. Хомутина Амурской области) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 95. – № 9. – С. 49–52.
5. Эколого-химическая оценка малой реки Зейско-Буреинской равнины (на примере реки Гильчин) / Т.П. Платонова, А.П. Пакулина, О.В. Тарасенко, С.А. Лобарев // Перспективы науки. – 2013. – № 10 (49). – С. 196–200.
6. Пакулина А.П., Платонова Т.П. Экологическая оценка ресурсов малых рек Амурской области // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 2. – С. 38–43.
7. Кашина В.А., Осипова С.В. Кислородный режим малых водоемов юга Амурской области // Проблемы экологии Верхнего Приамурья: сб. науч. тр. / под общ. ред. Л.Г. Колесниковой. – Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2011. – Вып. 13. – С. 20–33.
8. Кашина В.А., Осипова С.В. Параметры солевого состава ряда малых водоемов юга Амурской области // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/2/348.pdf> (дата обращения: 20.02.2015).
9. Колесникова Л.Г., Кашина В.А., Жуков Ф.А. Гидрохимическая характеристика природных озер Амурской области // Проблемы экологии Верхнего Приамурья: сб. науч. тр. / под общ. ред. Л.Г. Колесниковой. – Благовещенск: Изд-во БГПУ, 1999. – Вып. 4. – С. 24–31.
10. Харина С.Г., Колесникова Т.П. Динамика содержания биогенных элементов в воде водохранилищ агроландшафта в Амурской области // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 11. – С. 120–126.
11. Харина С.Г., Колесникова Т.П. Химико-микробиологическая оценка экологического состояния водоемов агроландшафтов Приамурья // Вестник АГАУ. – 2009. – № 10. – С. 72–76.
12. РД 52.24.309–92. Методические указания. Охрана природы. Гидросфера. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на сети Роскомгидромета. – СПб.: Изд-во Роскомгидромета, 1992. – 67 с.
13. Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». – М.: Федеральное агентство по рыболовству, 2010. – 153 с.
14. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – Министерство природных ресурсов РФ, 1992. – 55 с.
15. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: в 6 т. Т. 1. – М.: Недра, 1994. – 304 с.
16. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: в 6 т. Т. 3. – М.: Недра, 1996. – 352 с.
17. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: в 6 т. Т. 5. – М.: Экология, 1997. – 576 с.
18. Островский В.Н., Островский Л.А. Методические рекомендации по составлению эколого-геологических карт масштаба 1:200000 – 1:100000. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1996. – 61 с.

Поступила 02.03.2015 г.



UDC 550.849

## ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTIC OF SURFACE WATER OF THE GOLD MINE «PIONEER» IN AMUR REGION

Mikhail Yu. Lyapunov,

Amur State University, 21, Ignatevskoe Highway,  
Blagoveshchensk, 675027, Russia. E-mail: lyapunov@pokrmine.ru

Taking complex ecological measures is extremely necessary for successful functioning of the developed layers of minerals and adoption in this case of practical recommendations. These conditions can be acceptable, if adequate information on the contemporary state of natural environment both as a whole and its components will be obtained. When solving the ecological problems of local nature those geo-systems, which are most subjected to anthropogenic disturbances, connected with mining production, become the most vulnerable. The study of gold-ore layer «Pioneer» is connected with the forecast evaluation of adverse effect of mining operations on environment. For fulfilling these works the objective information on a deposit geo-ecological state is required.

**The aim** of the research is to analyze the contemporary ecological-geochemical condition of surface waters within the gold-ore layer «Pioneer».

**Methods of the study:** topographical-geochemical, statistical, topographical-ecological analysis, atomic-absorption, atomic-emissive and mass-spectral, analysis of literary and fund materials.

**Results.** According to the results of geo-ecological studies of the territory of gold-ore layer «Pioneer» the author has estimated the surface waters state. The author calculated the load factors according to the processed results of the analyses of aqueous tests for each element, the summary index of 1–2, 3–4 classes water pollution and estimated the pollution degree (permitted, moderately dangerous, dangerous, extremely dangerous). By the results of data processing the map of the results of surface water hydrochemical testing was built. The surface waters over the area under study are contaminated everywhere and they are characterized on total pollution from the moderately dangerous to the extremely dangerous degree. In essence, they are polluted with the following chemical elements: iron, manganese, aluminum, lithium, oxidizability, colorfulness and compounds is among the elements of the first classes of danger – mercury. The increased contents of iron, manganese, aluminum, lithium, organic matter, colorfulness are caused by natural geochemical and hydrochemical situation. The presence of swampiness, peats and, as a result, oxidizing hydrochemical conditions, contribute to their increased concentration.

### Key words:

Ecological-geochemical studies, load factor, gold mine, surface water, maximum permissible concentration, chemical element.

### REFERENCES

1. *Amurskaya oblast: vodnye resursy i osnovy regionalnoy vodokhozyaystvennoy deyatel'nosti* [Amur region: water resources and regional water management fundamentals]. Ed. by V.N. Zaslonsky. Ekaterinburg; Chita, RosNIIVKh Publ., 2005. 103 p.
2. Platonova T.P. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya malykh rek Amuro-Zeyskoy ravniny [Estimation of the ecological state of the small rivers of Amur-Zeya plain]. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 2, pp. 113–118.
3. Pakusina A.P. Soderzhanie organicheskogo veshchestva v vodnykh ekosistemakh kak pokazatel' ikh ekologicheskogo sostoyaniya [Content of organic matter in the aqueous ecosystems as the index of their ecological state]. *Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 9, pp. 86–90.
4. Platonova T.P. Ekologo-khimicheskaya otsenka kachestva vozdera agroladshafta (na primere oz. Khomutina Amurskoy oblasti) [Ecological-chemical estimation of the quality of waters of agrolandscape lake (on the example of Lake Khomutina of Amur region)]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2012, no. 5 (95), pp. 49–52.
5. Platonova T.P. Ekologo-khimicheskaya otsenka sostoyaniya maloy reki Zeysko-Bureinskoy ravniny (na primere reki Gilchin) [Ecological and chemical assessment of small river of Zeya-Bureinskoy plain (by the example the Gilchin river)]. *Science prospects*, 2013, no. 10 (49), pp. 196–200.
6. Pakusina A.P. Ekologicheskaya otsenka resursov malykh rek Amurskoy oblasti [Ecological estimation of the service lives of the small rivers of Amur region]. *Regional Environmental Issues*, 2014, no. 2, pp. 38–43.
7. Kashina V.A., Osipova S.V. Kislородnyy rezhim malykh vodoemov yuga Amurskoy oblasti [Small water oxygen regime in the South of the Amur region]. *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy ekologii Verkhnego Priamurya»* [Ecological problems of the upper Amur region. Proc.]. Ed. by L.G. Kolesnikova. Blagoveshchensk, Blagoveshchensk State Pedagogical University Publishing House, 2011, no. 13, pp. 20–33.
8. Kashina V.A., Osipova S.V. Parametry solevogo sostava ryada malykh vodoemov yuga Amurskoy oblasti [The parameters of salt composition of a number of small lakes in the South of Amur region]. *Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 2. Available at: <http://www.science-education.ru/pdf/2014/2/348.pdf> (accessed 20 February 2015).
9. Kolesnikova L.G., Kashina V.A., Zhukov F.A. Gidrokhimicheskaya kharakteristika prirodnykh ozer Amurskoy oblasti [Hydrochemical characteristics of natural lakes of Amur region]. *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy ekologii Verkhnego Priamurya»* [Ecological problems of the upper Amur region. Proc.]. Ed. by L.G. Kolesnikova. Blagoveshchensk, Blagoveshchensk State Pedagogical University Publishing House, 1999, no. 4, pp. 24–31.
10. Kharina S.G., Kolesnikova T.P. Dinamika soderzhaniya biogenykh elementov v vode vodokhranilishch agroladshafta v Amurskoy oblasti [Dynamics of nutrient content in water reservoirs of agrolandscape in Amur region]. *Bulletin of KrasGAU*, 2009, no. 11, pp. 120–126.
11. Kharina S.G., Kolesnikova T.P. Khimiko-mikrobiologicheskaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya vodoemov agroladshaftov Priamurya [Chemical-microbiological assessment of the ecological status of water bodies of cultivated lands in Amur region]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2009, no. 10, pp. 72–76.
12. RD 52.24.309–92. *Metodicheskie ukazaniya. Okhrana prirody. Gidrosfera. Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudeniy za zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushi na seti Roskomgidrometa* [Guidance document 52.24.309–92. The operating instruc-

- tions. Protection of nature. Hydrosphere. Organizing and conducting of sensitive observation of surface water pollution in the network of the Russian Committee of the hydro-meteorological service]. St. Petersburg, Roskomgidromet Publ., 1992. 67 p.
13. *Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»* [Order of Russian Federal Fisheries Agency from 18.01.2010 No. 20 «On approval of the regulations of the water quality of water objects of the fisheries value, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water fisheries values»]. Moscow, Federal Fisheries Agency, 2010. 153 p.
  14. *Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия* [Criteria of evaluation of the ecological situation of territories for the development of the zones of extraordinary ecological situation and zones of the ecological calamity]. Moscow, Ministry of Natural Resources, 1992, 55 p.
  15. Ivanov V.V. *Экологическая геохимия элементов* [Environmental geochemistry of elements]. Moscow, Nedra Publ., 1994. Vol. 1, 304 p.
  16. Ivanov V.V. *Экологическая геохимия элементов* [Environmental geochemistry of elements]. Moscow, Nedra Publ., 1996. Vol. 3, 352 p.
  17. Ivanov V.V. *Экологическая геохимия элементов* [Environmental geochemistry of elements]. Moscow, Ecology Publ., 1997. Vol. 5, 576 p.
  18. Ostrovskiy V.N., Ostrovskiy L.A. *Методические рекомендации по составлению эколого-геологических карт масштаба 1:200000 – 1:100000* [Methodical recommendations on constructing ecological-geological maps of scale 1:200000 – 1:100000]. Moscow, VSE-INGEO Publ., 1996. 61 p.

Received: 02 March 2015.

УДК 532.517.45

## МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСИ В КОНВЕКТИВНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

**Илюшин Борис Борисович,**

д-р физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. лаборатории физических основ энергетических технологий Института Теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1; ведущ. науч. сотр. лаборатории моделирования энергетических процессов Новосибирского Государственного Университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2. E-mail: ilyushin@itp.nsc.ru

**Митин Игорь Владимирович,**

инженер-исследователь лаборатории физических основ энергетических технологий Института Теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1; лаборант-исследователь лаборатории моделирования энергетических процессов Новосибирского Государственного Университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2. E-mail: imitin888@gmail.com

**Сиковский Дмитрий Филиппович,**

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физических основ энергетических технологий Института Теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1; ст. науч. сотр. лаборатории моделирования энергетических процессов Новосибирского Государственного Университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2. E-mail: dphs@itp.nsc.ru

**Актуальность.** Оценка степени антропогенной нагрузки на окружающую среду вредных и опасных загрязнений при плановых и чрезвычайных выбросах в атмосферу является важной задачей при планировании новых и эксплуатации имеющихся объектов энергетической инфраструктуры. Экспериментальные методы исследования в этой области слишком затратные и не всегда дают требуемую точность, особенно в сложных метеорологических условиях. Современные математические модели хотя и позволяют сделать качественные прогнозы последствий выбросов в атмосферу, однако количественные оценки, полученные с помощью этих моделей, дают приемлемую точность только для нейтрально стратифицированной атмосферы. Для более реалистичных условий требуется разработка новых, более совершенных и экономически целесообразных подходов.

**Целью работы:** развитие эффективных методов моделирования распространения примесей в атмосфере для информационного обеспечения экологической экспертизы и анализа экологической обстановки вблизи объектов энергетической (и др.) инфраструктуры.

**Метод исследования.** Используется численное моделирование лагранжевого траекторного подхода для задач распространения пассивной примеси в конвективном пограничном слое атмосферы, на базе модели случайных блужданий и ланжевеновской модели турбулентной дисперсии. Статистическая структура турбулентности описывается функцией плотности вероятностей для пульсаций вертикальной скорости, которая восстанавливается по вычисленным статистическим моментам. Тестируются 4 модели ФПВ. Результаты моделирования сравниваются с лабораторными и натурными данными.

**Результаты.** Численный расчет показал, что все реализуемые модели отражают асимметричный характер динамики переноса частиц под воздействием крупномасштабных конвективных вихревых структур в атмосферном пограничном слое и могут быть использованы для дальнейшего развития метода лагранжевого моделирования распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы.

### **Ключевые слова:**

Турбулентность, загрязнение атмосферы, конвективный пограничный слой атмосферы, численное моделирование, метод функции плотности вероятностей.

### **Введение**

Моделирование распространения примесей от источников в атмосферном пограничном слое имеет прямые приложения в задачах прогноза и экспертизы планируемых выбросов вредных и опасных загрязнителей в атмосферу, а также выбросов при чрезвычайных обстоятельствах, в том числе и

от объектов энергетической инфраструктуры. Используемые в современных расчетных методиках подходы, основанные на RANS моделях турбулентного переноса, К-теории или на гауссовой модели облака примеси, не позволяют в полной мере предсказать динамику распространения струи примеси в конвективном атмосферном погранич-

ном слое (КАПС). Согласно оценкам Пэскуила [1] такие модели обычно дают правильный результат с точностью до коэффициента 2. Оценки стандартных моделей Агентства по охране окружающей среды США показали, что при расчетах средних часовых концентраций в фиксированной точке согласование характеризуется скорее коэффициентом 3–4 и даже более. Если процесс турбулентного переноса характеризуется более чем одним механизмом переноса, т. е. несколькими масштабами длины и скорости (как, например, в стратифицированном пограничном слое атмосферы), то указанные модели оказываются полностью несостоятельными. Некоторые примеры такого рода приведены в работе [2].

Последние годы активно разрабатывается метод моделирования распространения примесей в КАПС, основанный на решении дифференциальных уравнений турбулентного переноса моментов второго порядка. Современные модификации моделей второго порядка во многих случаях позволяют описать распределение первых и вторых моментов. Однако и они оказываются слишком грубыми при моделировании КАПС [3–5]. Поведение струйки примеси в КАПС обусловлено влиянием крупномасштабных конвективных вихревых структур. Под воздействием этих структур с выраженной асимметрией вертикальной скорости струйка примеси от поднятого над поверхностью источника опускается, формируя на поверхности максимум концентрации, с последующим подъемом в перемешанный слой [6, 7]. Качественно описать такое поведение примеси в КАПС позволяет модель второго порядка [8]. Ее ограничение связано с использованием простых алгебраических замыканий для третьих моментов, в то время как величина асимметрии, как указывалось выше, оказывает определяющее влияние на процесс вертикального переноса. Как известно, модели градиентного типа не позволяют адекватно описать распределения третьих моментов в КАПС. Построение моделей третьего порядка замыкания для описания процесса распространения примеси требует дополнительной эмпирической информации о распределении ряда корреляций, данные измерений о которых отсутствуют (например, совместные корреляции концентрации и температуры второго и третьего порядков). Тем не менее, в работе [9] предложен и продемонстрирован иной путь учета влияния крупномасштабных вихревых структур на процесс распространения примеси в КАПС. В [9] используется модельная функция плотности вероятности (ФПВ), восстановленная по вычисленным распределениям вертикальной скорости в КАПС. Ее вид позволяет восстановить модельное поле скорости вихревых структур и затем учесть их влияние напрямую в конвективных слагаемых уравнения для концентрации. Такой подход позволил качественно и количественно описать распределение поля концентрации пассивной примеси в КАПС как от наземного, так и от поднятого над поверхностью источников. Однако

развитие такого подхода на случай «активных» примесей (инерционные, нагретые и т. д.) также требует информации о распределении ряда корреляций, данные о которых отсутствуют. Более перспективным для таких задач может оказаться метод, основанный на лагранжевом моделировании, с прямым учетом указанных свойств примеси в динамическом уравнении для частиц.

Основное преимущество лагранжевых моделей состоит в прямом моделировании нелинейной адвекции частиц примеси турбулентным полем скорости в лагранжевой системе координат, в которой субстанциональная производная по времени в транспортных уравнениях переходит в обычную производную по времени. При этом расчет концентрации примеси сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для координат лагранжевых частиц, что существенно упрощает вычисления и в то же время дает полную статистическую модель поля концентрации, устраняя необходимость решения проблемы замыкания для корреляций скорости и концентрации. Точность моделирования концентрации в лагранжевом подходе зависит лишь от точности используемой статистической модели для поля турбулентных пульсаций скорости [10]. В настоящее время активно развиваются лагранжевые модели турбулентной дисперсии [11], в которых скорость лагранжевой частицы моделируется с помощью уравнения Ланжевена (лагранжевы модели первого порядка, по терминологии [12]). Для ряда задач приемлемым выбором могут стать упрощенные Лагранжевы модели нулевого порядка [12] или модели случайных блужданий, в которых используются только уравнения для координат частиц, а поле скорости задается тем или иным случайным процессом с заданными статистическими характеристиками.

В данной работе представлены результаты тестирования лагранжевого моделирования распространения пассивной примеси в КАПС на основе модели случайных блужданий и лагранжевой модели турбулентной дисперсии с использованием ряда модельных ФПВ, восстановленных по вычисленным в КАПС распределениям вертикальной скорости.

#### Модели функции плотности вероятности ФПВ вертикальной скорости в конвективном атмосферном пограничном слое

Тестируются четыре модели ФПВ вертикальных пульсаций скорости восстановленных по вычисленным в [13] распределениям статистических моментов вертикальной скорости. Все эти модели имеют вид суммы двух гауссовых распределений, соответствующих восходящим и нисходящим потокам:

$$P(w) = \underbrace{\frac{a^+}{\sigma_+} \exp\left\{-\frac{(m^+ - w)^2}{2(\sigma_+)^2}\right\}}_{\text{восходящий поток}} + \underbrace{\frac{a^-}{\sigma_-} \exp\left\{-\frac{(m^- - w)^2}{2(\sigma_-)^2}\right\}}_{\text{нисходящий поток}}. \quad (1)$$

Из условий нормировки ФПВ и выражений для вычисления моментов  $n$ -го порядка распределения:

$$\int_R w^n P(w) dw = \langle w^n \rangle, \quad (2)$$

полагая  $n=1,2,3$ , получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} a^+ + a^- &= 1, \\ a^+ m^+ + a^- m^- &= 0, \\ a^+ [(m^+)^2 + \sigma_+^2] + a^- [(m^-)^2 + \sigma_-^2] &= \sigma^2, \\ a^+ [(m^+)^3 + 3m^+ \sigma_+^2] + a^- [(m^-)^3 + 3m^- \sigma_-^2] &= S \sigma^3. \end{aligned} \quad (3)$$

Требуются дополнительные предположения для замыкания (3). Отличия в тестируемых 4-х моделях касаются этих предположений.

### Модель функции плотности вероятности 1

В [9] ФПВ представляется в виде суммы зависимых распределений для восходящих и нисходящих потоков, обусловленных крупномасштабными вихревыми структурами, а также статистически независимого от них распределения турбулентных пульсаций инерционного интервала спектра («фоновой» турбулентности), каждая из которых имеет вид функции Гаусса:

$$\begin{aligned} P(\hat{w}, \tilde{w}) &= P_b(\hat{w}) P_c(\tilde{w}) = \underbrace{\frac{1}{2\pi\sigma_b} \exp\left\{-\frac{\hat{w}^2}{2\sigma_b^2}\right\}}_{\text{ФПВ «фоновой» турбулентности}} \times \\ &\times \underbrace{\left[ \frac{a^+}{\sigma_+} \exp\left\{-\frac{(m^+ - \tilde{w})^2}{2(\sigma_+)^2}\right\} + \frac{a^-}{\sigma_-} \exp\left\{-\frac{(m^- - \tilde{w})^2}{2(\sigma_-)^2}\right\} \right]}_{\text{ФПВ когерентных структур}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\hat{w}$  – вертикальная скорость пульсаций «фоновой» турбулентности;  $\tilde{w}$  – вертикальная скорость конвективных вихревых структур;  $\sigma_b$  – дисперсия флуктуаций вертикальной скорости инерционного интервала спектра;  $a^+$  и  $a^-$  – весовые коэффициенты;  $\sigma_+^2$  и  $\sigma_-^2$  – дисперсии;  $m^+$  и  $m^-$  – центры распределений восходящих и нисходящих потоков в крупномасштабных вихревых структурах, соответственно. Поскольку вертикальная скорость в КАПС является суммой:  $w = \hat{w} + \tilde{w}$ , для вычисления ФПВ для скорости  $w$  необходимо (4) помножить на дельта-функцию  $\delta(w - \hat{w} - \tilde{w})$  и проинтегрировать по всем скоростям  $\hat{w}$  и  $\tilde{w}$ , таким образом получим модель вида (1):

$$\begin{aligned} P(w) &= \int_R \delta(w - \hat{w} - \tilde{w}) P(\hat{w}, \tilde{w}) d\hat{w} d\tilde{w} = \\ &= \frac{a^+}{\sigma_+} \exp\left\{-\frac{(m^+ - \tilde{w})^2}{2(\sigma_+)^2}\right\} + \frac{a^-}{\sigma_-} \exp\left\{-\frac{(m^- - \tilde{w})^2}{2(\sigma_-)^2}\right\}, \end{aligned}$$

где  $\sigma_+^2 = (\sigma_c^+)^2 + \sigma_b^2$ , и  $\sigma_-^2 = (\sigma_c^-)^2 + \sigma_b^2$ . Два дополнительных условия для замыкания (3) в Модели ФПВ 1 имеют вид:  $(\sigma_c^+)^2 = (m^+)^2$  и  $\sigma_b^2 = 1/3 \langle w^2 \rangle$ .

### Модель функции плотности вероятности 2 из [14]

Модель ФПВ 2, в отличие от Модели ФПВ 1, вместо условия  $(\sigma_c^+)^2 = (m^+)^2$  включает в себя усло-

вие [14]:  $(\sigma_c^+)^2 = (m^+)^2$  (также использовалось в [9]). В [14] не рассматривается процедура выделения вертикальных пульсаций крупномасштабных конвективных вихревых структур из полной ФПВ. Эта процедура необходима для моделирования распространения примеси в КАПС методом, представленным в настоящей работе (см. ниже). Это можно сделать, полагая, как и в [9]:  $(\sigma_c^+)^2 = (\sigma_c^+)^2 + \sigma_b^2$  и определив  $\sigma_b$ , либо как и в Модели ФПВ 1 ( $\sigma_b^2 = 1/3 \langle w^2 \rangle$ ), либо положив ее равной дисперсии поперечных турбулентных пульсаций  $\langle v^2 \rangle$ , вычисленных в [13].

### Модель функции плотности вероятности 3 из [15]

Модель ФПВ 3 вида (1) отличается от Модели ФПВ 2 использованием для замыкания условия для четвертых моментов, полученного из (2) при  $n=4$ :

$$\begin{aligned} a^+ [(m^+)^4 + 6(m^+)^2(\sigma^+)^2 + 3(\sigma^+)^4] + \\ + a^- [(m^-)^4 + 6(m^-)^2(\sigma^-)^2 + 3(\sigma^-)^4] = \langle w^4 \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Для вычисления  $\langle w^4 \rangle$  в (5) используется предположение о квазигауссовом характере распределения пульсаций (гипотеза квазинормальности Миллионщикова) [16]:

$$\langle w^4 \rangle = 3 \langle w^2 \rangle^2. \quad (6)$$

Также используются соотношения, взятые из наблюдений [17, 18]:

$$a^+ = 0,4, \quad a^- = 0,6. \quad (7)$$

Отметим, что условия (6), (7) заведомо не выполняются по всей высоте КАПС, но в силу своей простоты представляют интерес для анализа и сравнения с другими моделями.

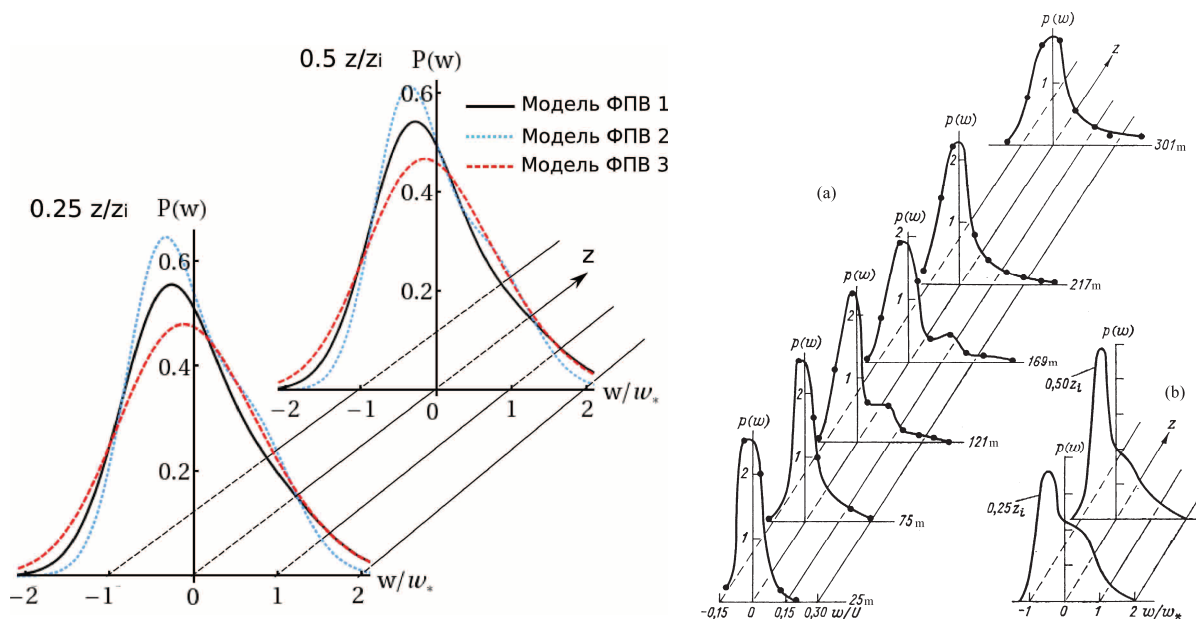
### Модель функции плотности вероятности 4

Модель ФПВ 4 совпадает с Моделью ФПВ 3, за исключением использования условия квазинормальности (6). Вместо него используется вычисленное в [13] распределение  $\langle w^4 \rangle$  по модели [20]:

$$\langle w^4 \rangle = -\frac{\tau}{C_k} \left[ \frac{6 \langle w^3 \rangle \frac{\partial \langle w^2 \rangle}{\partial z} + 4 \langle w^2 \rangle \frac{\partial \langle w^3 \rangle}{\partial z}}{\partial z} \right] + 3 \langle w^2 \rangle^2. \quad (8)$$

### Моделирование распространения примеси в конвективном атмосферном пограничном слое

Для анализа моделей ФПВ 1–4 были выполнены тестовые расчеты. Вычисления показали, что модель ФПВ 4, включающая в себя условие (8), не соответствует условию существования решений по всей высоте КАПС. Это несоответствие, возможно, связано с недостаточной точностью использованной приближенной алгебраической модели (8) для вычисления  $\langle w^4 \rangle$ . Результаты восстановленной ФПВ на высотах  $0,5z/z_i$  и  $0,25z/z_i$  по моделям 1–3 представлены на рис. 1. Для сравнения на рис. 1 также представлены данные восстановленной ФПВ натурных измерений в КАПС [19] и рас-



**Рис. 1.** Восстановленные профили  $P(w)$  по Модели ФПВ 1–3 на высоте  $z/z_i=0,5$  и  $z/z_i=0,25$  (слева), данные натуральных измерений [19] (а) и вычисленные по модели Дирдорфа [6] (б) (справа)

**Fig. 1.** Profiles  $P(w)$  recovered by the probability density function (PDF) 1–3 at the height  $z/z_i=0,5$  and  $z/z_i=0,25$  (left), the data of full-scale measurements [19] (a) and those computed by the Deardorff model [6] (b) (right)

четыре Дирдорфа [6]. Отметим, что последние относятся к другим условиям КАПС. Тем не менее, из рис. 1 видно, что Модели ФПВ 1–3 описывают асимметричный характер вертикальных пульсаций скорости в КАПС: менее вероятные восходящие потоки с большей амплитудой чередуются более вероятными нисходящими потоками с меньшей амплитудой. При этом относительные вероятности последних оказываются разными по величине. Для горизонтально однородного пограничного слоя атмосферы вероятность вертикальной скорости пульсаций  $\tilde{w}(x,z)$  пропорциональна горизонтальной области для когерентной структуры со скоростью  $\tilde{w}(x,z)$  [9]:

$$P_c(\tilde{w})d\tilde{w} = \frac{dx}{\lambda_{\max}/2},$$

где  $\lambda_{\max}$  – линейный горизонтальный размер ячейки (пара смежных конвективных вихревых структур с противоположным направлением закручивания). Горизонтальная скорость  $\tilde{u}(x,z)$  находится из закона сохранения массы.

Представление ФПВ вертикальной скорости в виде (1) позволяет, при лагранжевом моделировании, вычислять смещение каждой частицы  $\ell$  за временной промежуток  $\Delta t$  в виде суперпозиции скорости смещений под действием осредненного потока, вызванного ветром в конвективном АПС, «фоновой» турбулентности, моделируемой Гауссовским процессом, и под действием когерентных структур  $\vec{v} = \{\tilde{u}(x,z), \tilde{w}(x,z)\}$ , восстановленных по ФПВ:

$$\vec{\ell}(\vec{r}, t + \Delta t) = \vec{\ell}(\vec{r}, t) + (\vec{V}(\vec{r}, t) + \vec{v}(\vec{r}, t) + \vec{\tilde{v}}(\vec{r}, t)) \Delta t. \quad (9)$$

Отметим, что подход, основанный на использовании (9), является упрощенной Лагранжевой моделью нулевого порядка. С этой целью в данной работе были выполнены расчеты с использованием лагранжевой модели первого порядка (уравнения Ланжевена) [12] для пассивной примеси, в которой эволюция поля скорости «фоновой» турбулентности  $\vec{v}$  в уравнении (9) имеет вид:

$$d \begin{pmatrix} \hat{v}_i \\ \sigma_i \end{pmatrix} = - \frac{\hat{v}_i}{\tau_L \sigma_i} dt + \sqrt{\frac{2}{\tau_L}} dW_i + \frac{d\sigma_i}{dx} dt, \quad (10)$$

где  $\tau_L^{-1} = (0,5 + 0,75C_0)\epsilon/k$  – интегральный масштаб Лагранжа;  $W_i(t)$  – винеровский процесс,

$$\sigma_i = \sqrt{\langle \hat{v}_i^2 \rangle}.$$

На рис. 2 представлено мгновенное поле концентрации пассивной примеси в АПС для источника, расположенного на высоте  $z_s = 0,5z_i$ , вычисленное по (9) с использованием Модели ФПВ 1. Численное моделирование выполнялось путем равномерного запуска частиц примеси в точке расположения источника, с последующим отслеживанием их движения в соответствии с (9) в течение трех часов физического времени. Как и в работе [7],  $z_i$  – высота слоя инверсии;  $w_*$  – конвективный масштаб скорости; а  $t_* = z_i/w_*$  – масштаб времени. Ось  $x^* = xw_*/(Uz_i)$  направлена по вектору среднего ветра на высоте источника. Результаты моделирования показали, что крупномасштабные структуры оказывают сильное влияние на движение частиц в вертикальном направлении (рис. 2). На рисунке

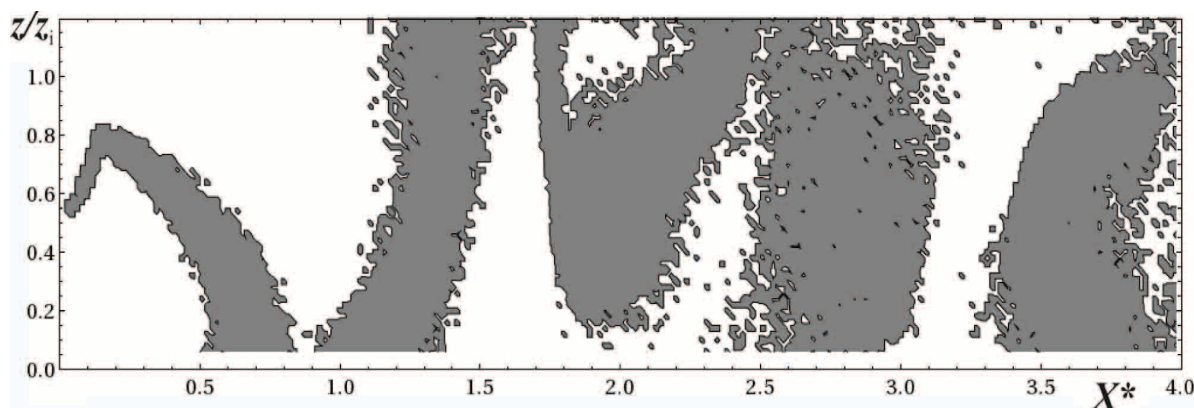


Рис. 2. Мгновенное распространение примеси в конвективном пограничном слое, вычисленное по модели (9) с использованием Модели ФПВ 1

Fig. 2. Immediate admixture distribution in convective boundary layer computed by the model (9) using the PDF Model 1

хорошо видно влияние ячеистой структуры КАПС на движение частиц примеси. Отметим, что перенос происходит по всей высоте КАПС.

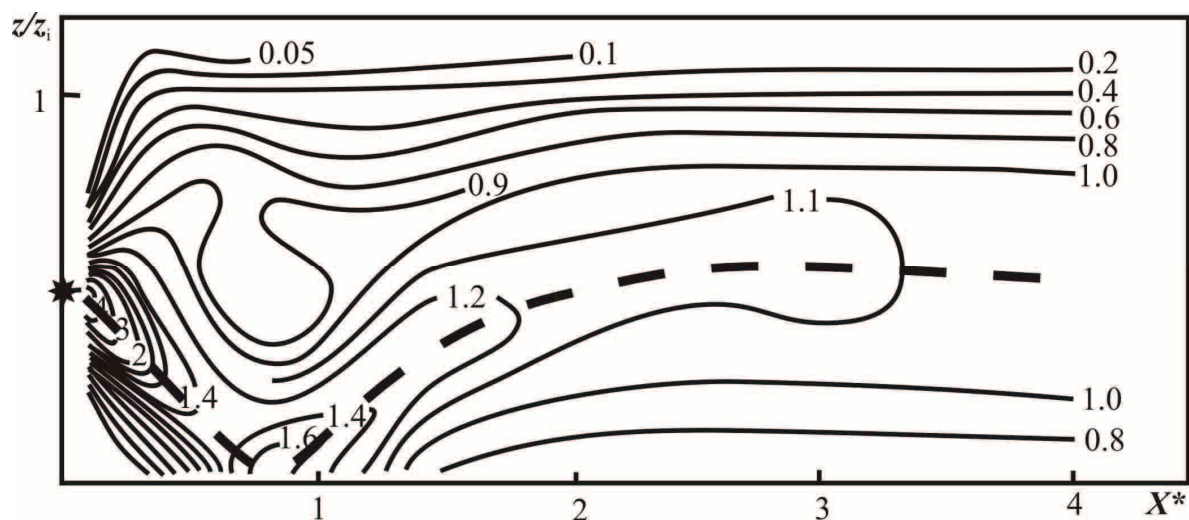
Для сравнения с данными эксперимента [7] вычисленное поле концентрации проинтегрировано по поперечной координате. Полученные результаты по Моделям ФПВ 1–3 с использованием (9) и (10) представлены на рис. 3. Также на рис. 3 представлены распределения средней концентрации примеси, измеренные в [7] для источника, расположенного в середине КАПС. Видно, что результаты расчетов отражают измеренную картину поля концентрации примеси: ось факела примеси, испущенного из точечного источника, расположенного в середине конвективного АПС, резко опускается к поверхности и снова поднимается в перемешанный слой. Отличия Моделей ФПВ 1–3 мало сказываются на поле распределения концентрации примеси в КАПС. На рис. 4 представлены распределения вычисленной по Моделям ФПВ 1–3 с использованием (9) и (10) и измеренной в [7] наземной концентрации примеси.

Вычисления показали, что наземная концентрация примеси, вычисленная по Модели ФПВ 1 с использованием (10), лучше воспроизводит распределение концентрации примеси вблизи максимума, но вдали от источника ее величина, как и у Моделей ФПВ 1–3 с использованием (9), оказывается заниженной, хотя и менее значительно (рис. 4). Отметим, что Модель ФПВ 2 дает существенную ошибку в местоположении максимума концентрации и сильно занижает ее величину на расстояниях  $x^* > 0,7$ . Модель ФПВ 3 хотя и позволяет описать распределение концентрации приме-

си не хуже Модели ФПВ 1, но, как указывалось выше, включает в себя ряд спорных эмпирических предположений.

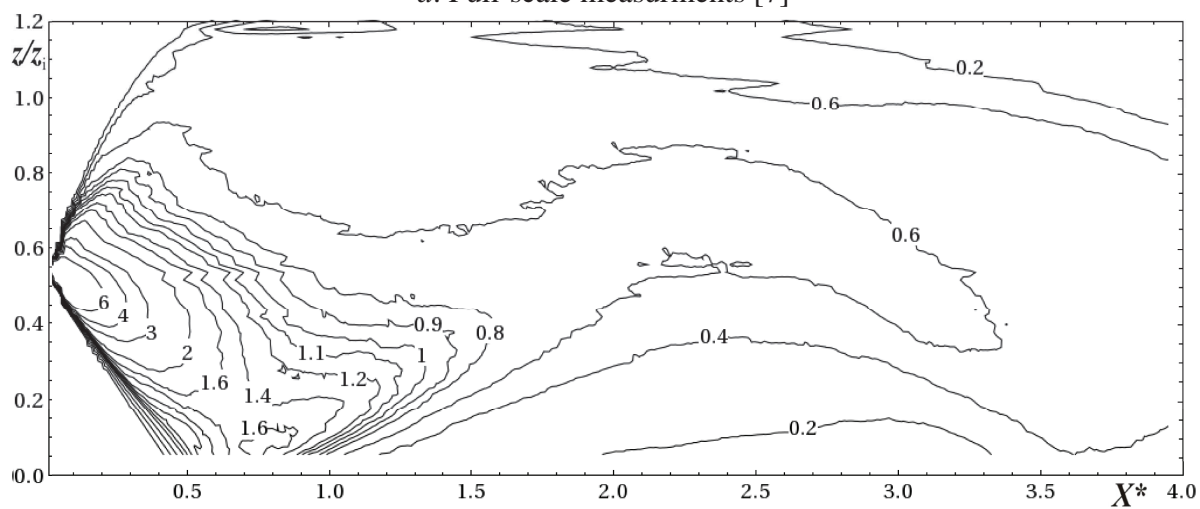
#### Заключение

Представлены результаты тестирования четырех моделей восстановления ФПВ вертикальных пульсаций скорости для описания процесса распространения пассивной примеси в КАПС. Анализ и тестовые расчеты показали, что модель ФПВ 4 не позволяет восстановить ФПВ по всей высоте КАПС. Модели ФПВ 1–3 отражают асимметричный характер динамики переноса частиц под воздействием крупномасштабных конвективных вихревых структур. При этом Модель ФПВ 2, в отличие от Моделей ФПВ 1 и 3, дает значительную ошибку в местоположении максимума концентрации, а Модель ФПВ 3 включает в себя эмпирическое предположение о постоянстве отношения интенсивности нисходящих и восходящих потоков  $a^+/a^- = 2/3$  по всей высоте КАПС, которое строго справедливо только для средней области КАПС, а также предполагает квазигансовый характер распределения пульсаций. Модель ФПВ 1 воспроизводит поле наземной концентрации примеси ближе к данным эксперимента и представляется более предпочтительной для моделирования ФПВ в КАПС. Развита на ее основе модель распространения примеси, основанная на нормализованном уравнении Ланжевена, дает близкие эксперименту результаты и может быть использована при развитии представленного метода для примесей с эффектом инерционности, плавучести, реагирующих и др. частиц.



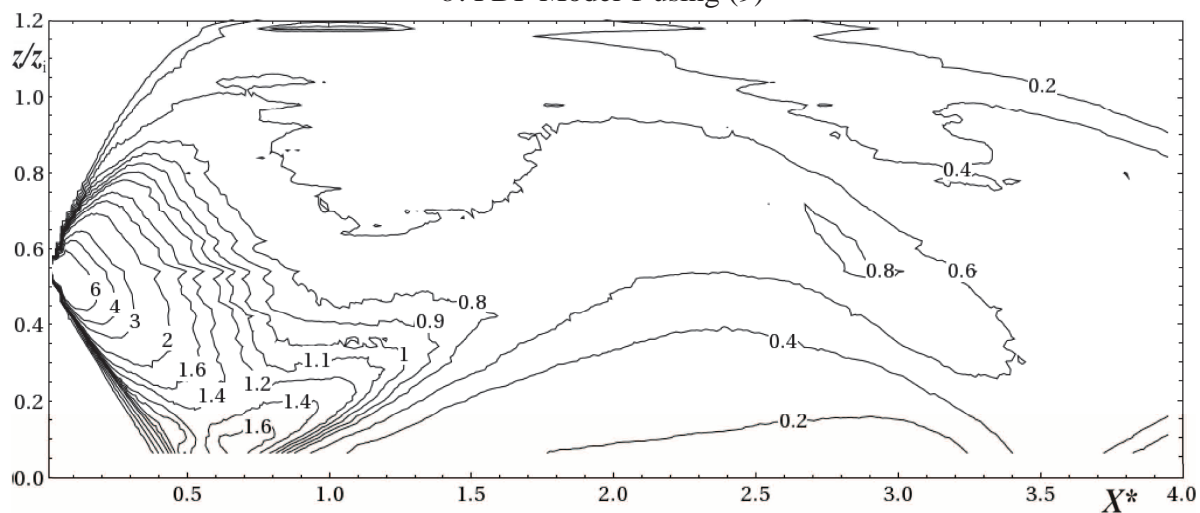
*a.* Натурные измерения [7]

*a.* Full-scale measurements [7]



*б.* Модель ФПВ 1 с использованием (9)

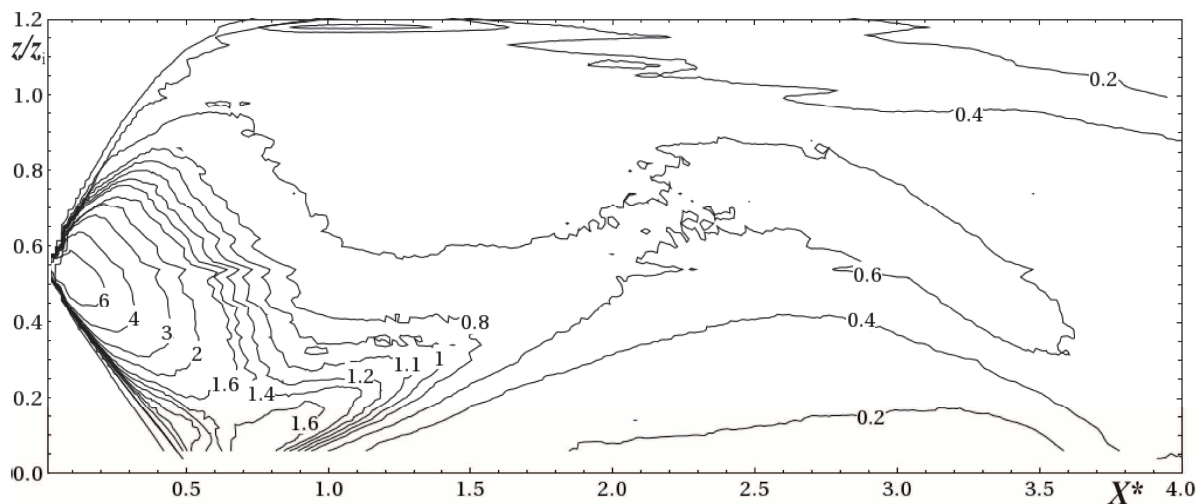
*b.* PDF Model 1 using (9)



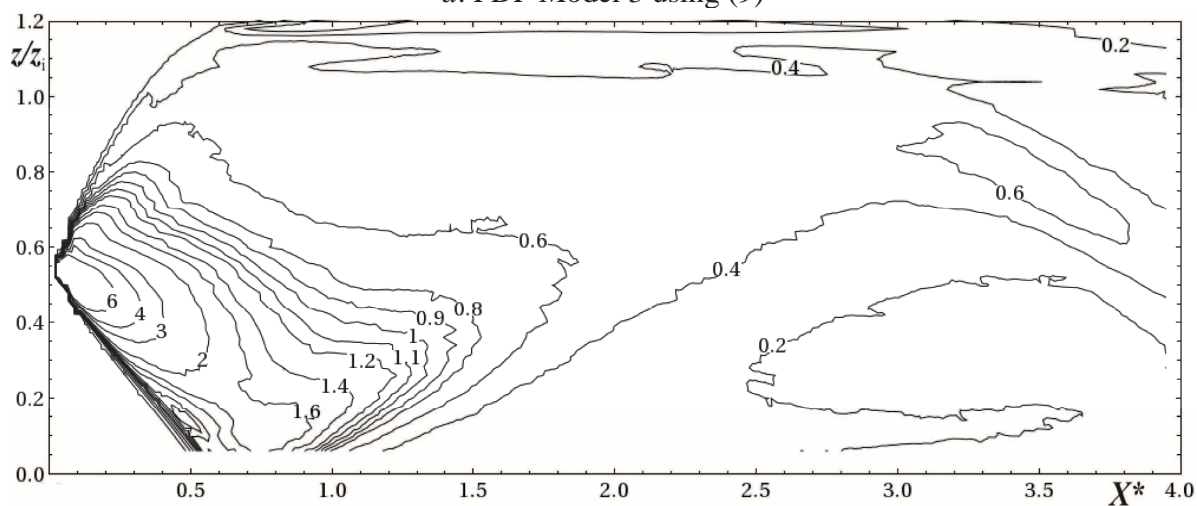
*в.* Модель ФПВ 2 с использованием (9)

*c.* PDF Model 2 using (9)





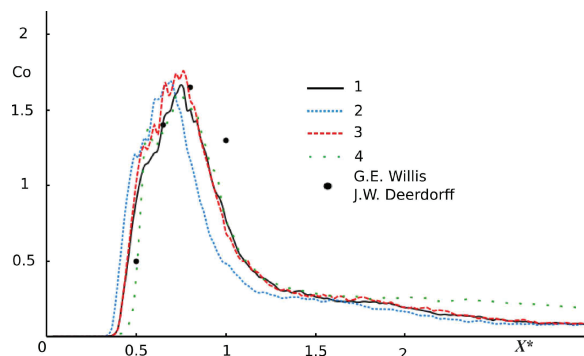
г. Модель ФПВ 3 с использованием (9)  
d. PDF Model 3 using (9)



д. Модель ФПВ 1 с использованием (10)  
e. PDF Model 1 using (10)

**Рис. 3.** Измеренное в [7] и вычисленное по Моделям ФПВ 1–3 с использованием (9), а также по Модели ФПВ 1 с использованием (10) проинтегрированное поле концентрации примеси от источника, расположенного в середине КАПС

**Fig. 3.** Integrated admixture concentration field from the source in the middle of convective planetary boundary layer measured in [7] and computed by the models PDF 1–3 using (9) as well as by the model PDF 1 using (10)



**Рис. 4.** Распределение наземной концентрации, измеренное в [7], вычисленное по Моделям ФПВ 1–3 с использованием (9) (линии 1–3), а также вычисленные по Модели ФПВ 1 с использованием (10) (линия 4)

**Fig. 4.** Distribution of concentration measured in [7], calculated by the models PDF 1–3 using (9) (lines 1–3) and calculated by the model PDF 1 using (10) (line 4)

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14–29–00203.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pasquill F. Atmospheric diffusion. 2<sup>nd</sup> ed. – New York: Hasted Press, John Wiley & Sons, 1974. – 429 p.
2. Tennekes H., Lumley J.L. A first course in Turbulence. – Cambridge: MIT Press, 1972. – 300 p.
3. Enger L. A higher order closure model applied to dispersion in a convective PBL // Atmospheric Environment. – 1986. – V. 20. – № 5. – P. 879–894.
4. Duynkerke P.G. Application of the E- $\epsilon$  turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer // J. Atmos. Sci. – 1988. – V. 45. – № 5. – P. 865–880.
5. Andren A. A TKE-dissipation model for the Atmospheric Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorol. – 1991. – V. 56. – P. 207–221.
6. Van Dop H., Frans T.M. Nieuwstadt // Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling. – Dordrecht: D. Reider Publishing Company, 1981. – 358 p.
7. Willis G.E., Deardorff J.W. A laboratory study of dispersion from a source in the middle of the convective mixed layer // Atmospheric Environment. – 1981. – V. 15. – P. 109–117.
8. Илюшин Б.Б., Курбацкий А.Ф. Моделирование распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32. – № 3. – С. 307–322.
9. Pyushin B.B. Use of the higher moments to construct pdf's in stratified flows // Closure strategies for turbulent and transitional flows // Eds. B.E. Launder, N.D. Sandham. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – P. 683–699.
10. Wilson J.D., Sawford B.L. Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere // Boundary Layer Meteorology. – 1996. – V. 78. – P. 191–210.
11. Minier J.-P., Chibbaro S., Pope S.B. Guidelines for the formulation of Lagrangian stochastic models for particle simulations of single-phase and dispersed two-phase turbulent flows // Phys. Fluids. – 2014. – V. 26. – P. 113303.1–113303–32.
12. Wilson J.D. A critical examination of the random displacement model of turbulent dispersion // Boundary Layer Meteorology. – 2007. – V. 125. – P. 399–416.
13. Илюшин Б.Б. Моделирование суточной эволюции атмосферного пограничного слоя // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50. – № 3. – С. 282–292.
14. Baerentsen J.H., Berkowicz R. Monte-Carlo simulation of plume diffusion in the convective boundary layer // Atmos. Environ. – 1964. – V. 18. – P. 701–712.
15. Jaynes E.T. Information theory and statistical mechanics // Phys. Rev. – 1957. – V. 106. – P. 620–630.
16. Миллионщиков М.Д. К теории однородной изотропной турбулентности // Изв. АН. СССР, сер. геогр. и геофиз. – 1941. – Т. 5. – № 4–5. – С. 433–446.
17. Fritsch S.A., Businger J.A. A study of convective elements in the atmospheric surface layer // Boundary-Layer Met. – 1973. – V. 3. – P. 301–328.
18. Hunt J.C., Kaimal J.C., Gaylor J.E. Eddy structure in the convective planetary boundary layer—new measurements and new concepts // Q.J.R. met. Soc. – 1988. – V. 114. – P. 827–858.
19. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. – Л.: Гидрометеониздат, 1991. – 278 с.
20. Илюшин Б.Б., Курбацкий А.Ф. К моделированию тройных корреляций в конвективном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. сер. Физика Атмосферы и Океана. – 1998. – Т. 34. – № 5. – С. 640–644.

Поступила 24.03.2015 г.

UDC 532.517.45

## MODELS OF PROBABILITY DENSITY FUNCTION FOR DESCRIBING POLLUTANT DISTRIBUTION IN CONVECTIVE PLANETARY BOUNDARY LAYER

**Boris B. Ilyushin,**

Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Akademik Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, Novosibirsk, 2, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia. Email: ilyushin@itp.nsc.ru

**Igor V. Mitin,**

Institute of Thermophysics SB RAS1, Akademik Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, Novosibirsk, 2, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia. Email: imitin888@gmail.com

**Dmitry Ph. Sikovsky,**

Institute of Thermophysics SB RAS, Akademik Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, Novosibirsk, 2, Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia. Email: dpsh@itp.nsc.ru

**Relevance.** *The assessment of anthropogenic pollutant loads during scheduled and emergency emissions into atmosphere is an important problem to plan new or to exploit the present energy objects of the energy infrastructure. The experimental research in the area is too expensive and does not always give the required accuracy especially under adverse weather conditions. Although the modern mathematical models are able to provide qualitative predictions, caused by the effects of air emissions, but quantitative estimations, obtained by these models, give an adequate accuracy only for neutrally stratified atmosphere boundary layer. It is required to develop a new more advanced and cost-effective approaches for more realistic conditions.*

**The main aim of the study** is to develop the efficient methods of the atmospheric dispersion modeling to provide information about the environmental review and analysis of the ecological conditions near objects of the energy infrastructure.

**The method used in the study.** The numerical stochastic Lagrangian modeling of the passive tracer in the convective planetary boundary layer (PBL) was used based on the random walk process and Langevin model of the turbulent dispersion. The statistical structure of turbulence is described by the probability density function (PDF) of the vertical velocity fluctuations, which is recovered by the calculated statistical moments of the vertical velocity fluctuations. Four models of the PDF reconstruction are studied. The results have been tested against ones from water-tank experiments (Willis and Deardorff) and from the observational data in convective PBL.

**The results.** Numerical calculations show that the implemented models have the asymmetric distribution of the PBL vertical velocity amplitudes: the fast downward and slow upward flows, and may be further used to develop the method of the Lagrangian modeling of the air pollutant dispersion in the convective PBL.

**Key words:**

Turbulence, air pollution, convective planetary boundary layer, numerical simulation, PDF method.

The research was financially supported by the grant RSF no. 14-29-00203.

**REFERENCES**

1. Pasquill F. *Atmospheric diffusion*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Hastled Press, John Wiley & Sons, 1974. 429 p.
2. Tennekes H., Lumley J.L. *A first course in Turbulence*. Cambridge, MIT Press, 1972. 300 p.
3. Enger L. A higher order closure model applied to dispersion in a convective PBL. *Atmospheric Environment*, 1986, vol. 20, no. 5, pp. 879-894.
4. Duynkerke P.G. Application of the E- $\epsilon$  turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1988, vol. 45, no. 5, pp. 865-880.
5. Andren A. A TKE-dissipation model for the Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1991, vol. 56, pp. 207-221.
6. Van Dop H., Frans T.M. Nieuwstadt. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*. Dordrecht, D. Reider Publishing Company, 1981. 358 p.
7. Willis G.E., Deardorff J.W. A laboratory study of dispersion from a source in the middle of the convective mixed layer. *Atmospheric Environment*, 1981, vol. 15, pp. 109-117.
8. Ilyushin B.B., Kurbatskii A.F. Modeling of Contaminant Dispersion in the Atmospheric Convective Boundary Layer. *Izv. RAN. Phys. Atmos. and Ocean*, 1996, vol. 32, no. 3, pp. 283-297.
9. Ilyushin B.B. Use of the higher moments to construct pdf's in stratified flows. *Closure strategies for turbulent and transitional flows*. Eds. B.E. Launder, N.D. Sandham. Cambridge, Cambridge University Press, 2001. pp. 683-699.
10. Wilson J.D., Sawford B.L. Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere. *Boundary Layer Meteorology*, 1996, vol. 78, pp. 191-210.
11. Minier J.-P., Chibbaro S., Pope S.B. Guidelines for the formulation of Lagrangian stochastic models for particle simulations of single-phase and dispersed two-phase turbulent flows. *Phys. Fluids*, 2014, vol. 26, pp. 113303.1-113303-32.
12. Wilson J.D. A critical examination of the random displacement model of turbulent dispersion. *Boundary Layer Meteorology*, 2007, vol. 125, pp. 399-416.
13. Ilyushin B.B. Simulation of the Diurnal Evolution of the Atmospheric Boundary Layer. *Izv. RAN. Phys. Atmos. and Ocean*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 246-255.
14. Baerentsen J.H., Berkowicz R. Monte-Carlo simulation of plume diffusion in the convective boundary layer. *Atmos. Environ.*, 1964, vol. 18, pp. 701-712.
15. Jaynes E.T. Information theory and statistical mechanics. *Phys. Rev.*, 1957, vol. 106, pp. 620-630.
16. Millionshtchikov M.D. K teorii odnorodnoy izotropnoy turbulentnosti [On the role of the third moments in isotropic turbulence]. *Izv. AN SSSR, ser. geographical. and geophysical.*, 1941, vol. 5, no. 4-5, pp. 433-446.
17. Fritsch S.A., Businger J.A. A study of convective elements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Met.*, 1973, vol. 3, pp. 301-328.
18. Hunt J.C., Kaimal J.C., Gaylor J.E. Eddy structure in the convective planetary boundary layer-new measurements and new concepts. *Q.J.R. met. Soc.*, 1988, vol. 114, pp. 827-858.
19. Byzova N.L. Ivanov V.N. Garger E.K. *Eksperimentalnye issledovaniya atmosferno diffuzii i raschety rasseyaniya primesi* [Experimental investigations of atmospheric diffusion and pollution dispersion calculations]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 278 p.
20. Ilyushin B.B. and Kurbatskii A.F. Modeling Triple Correlations in the Convective Atmospheric Boundary Layer. *Izv. RAN. Phys. Atmos. and Ocean*, 1988, vol. 34, no. 5, p. 575-579.

Received: 24 March 2015.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРАВНИТЕЛЬНО-ИСТОРИЧЕСКОГО МЕТОДА И ГЕОТЕРМИИ КАК НОВОГО МЕТОДА РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

**Искоркина Альбина Альбертовна,**

аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: iskorkina.a@mail.ru

**Брылина Ирина Владимировна,**

канд. филос. наук, доцент кафедры философии Института социально-гуманитарных технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ibrylina@yandex.ru

**Корниенко Алла Александровна,**

д-р филос. наук, профессор, заведующая кафедрой философии Института социально-гуманитарных технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: allaphil@tpu.ru

**Исаев Валерий Иванович,**

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: isaevvi@tpu.ru

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью совершенствования методики оценки ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом, основанным на палеореконструкциях геотемпературного режима нефтематеринских отложений.

**Цель исследований:** оценка влияния векового хода температур на поверхности Земли на геотермический режим нефтематеринских отложений юго-востока Западной Сибири, на степень реализации их генерационного потенциала.

**Объекты исследований:** среднегодовые температуры в мезозое и кайнозое южной палеоклиматической зоны Западной Сибири, баженовские отложения мезозойско-кайнозойского разреза, вскрытого глубокими скважинами на широтах Томской и Новосибирской областей.

**Методы исследования:** аналитическая сводка реконструкций векового хода температур на дневной поверхности в мезозое-кайнозое, выполненных с применением актуалистического метода; метод палеотемпературного моделирования для количественной оценки влияния палеоклиматического фактора на геотермический режим материнских отложений и интенсивность генерации углеводородов.

**Результаты исследований.** Проведено географическое и геохронологическое обобщение опубликованных в период 1974–2011 гг. данных о вековом ходе температур на поверхности Земли юго-востока Западной Сибири. Данные получены рядом авторов на основе сравнительно-исторического анализа литологии осадочных толщ, ареалов флоры, материалов изотопной и магнетиальной термометрии. Для южной палеоклиматической зоны (Томская, Новосибирская и Омская области) построен «местный» вековой ход температур на земной поверхности начиная с юрского времени. Палеотемпературным моделированием разреза осадочного чехла, включая нефтематеринские отложения, выделены по геотемпературному критерию очаги интенсивной генерации баженовских нефтей, выполнен расчет и анализ распределения относительной плотности ресурсов нефтей. Получена количественная оценка влияния палеоклимата на геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты, формирующих залежи углеводородов нефтегазоносных комплексов томских и новосибирских нефтепромыслов. Показано, что в случае неучета палеоклимата невозможно адекватно восстановить термическую историю материнских отложений, что может занижать до 2-х раз и более величины расчетных ресурсов объемно-генетическим методом. Использование «местного» векового хода температур на поверхности Земли повышает эффективность технологии определения прогнозных ресурсов, позволяя более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования, не завышая/занижая (до 30–40 %) расчетные ресурсы. Продемонстрированы преемственность и научно-практическая значимость сочетания сравнительно-исторического (актуалистического) метода классической геологии и нового метода разведочной геофизики – геотермии – в решении задач оценки ресурсов углеводородов.

### **Ключевые слова:**

Эффективная методика, ресурсы углеводородов, палеоклимат, актуалистический метод, баженовская свита, метод палеотемпературного моделирования, юго-восток Западной Сибири.

### **Введение**

Россия является значимым поставщиком нефти на мировой рынок. Нефть является национальным ресурсом, одним из источников мощи России. Поэтому вопросы, связанные с разработкой новых ресурсоэффективных и энергос-

берегающих технологий поисков, разведки и добычи нефти, основанных на современной научной методологии, новых методик оценки ресурсов углеводородов, являются чрезвычайно важными для государства и актуальными для науки и бизнеса.

Наряду с дисциплинарными методами, используемыми в геологии на протяжении веков, сегодня пришло время переосмысления и расширения традиционно используемой методологии, обогащения ее междисциплинарным подходом (метод геотермии), и использования трансдисциплинарных принципов (холистичности, экстраполяции, многовариативности, темпоральности и др.).

В геологических исследованиях уже более трех веков повсеместно применяется сравнительно-исторический метод *классической* геологии – актуализм. Чарльз Лайель сформулировал положение, согласно которому современные природные процессы являются ключом к познанию процессов далекого геологического прошлого [1]. Идея этого подхода заключается в том, что все климатические и геологические процессы в далеком прошлом можно сопоставить с современными, а между современными и прошлыми процессами можно провести прямые аналогии. Следовательно, для того чтобы восстановить, например, палеоклиматические события прошлого нужно изучить аналогичные современные процессы и характеристики современных процессов перенести на прошлые. Таким образом, концептуальной основой сравнительно-исторического метода является допущение, что наблюдения над современными процессами позволяют судить о ходе и характеристиках аналогичных процессов в далеком геологическом прошлом.

Геотермия – это не только область теоретической геофизики, но и *формирующийся* метод разведочной геофизики [2], дающий важнейшую количественную информацию при решении как фундаментальных геодинамических и палеоклиматических проблем, проблем региональных нефтегеологических и металлогенических исследований, так и в прогнозно-поисковых работах. Особая значимость геотермии проявляется в проводимых прогнозно-поисковых нефтегеологических исследованиях. Значимость состоит в том, что на начальном этапе исследований по геотемпературному критерию определяются очаги генерации нефти. Так решается концептуальная задача о «главном источнике» углеводородов (УВ), которая определяет эффективность стратегии поисков [3].

Ниже показано, как результаты применения *актуалистического метода* позволили восстановить палеоклимат – вековой ход температур на дневной поверхности в мезозойско-кайнозойском прошлом Земли. Это сделало возможным *методом палеотемпературного моделирования* количественно оценить палеоклиматический фактор интенсивности генерации УВ и в конечном итоге усовершенствовать методику оценки ресурсов углеводородов на территории Западной Сибири. Объект исследований – недра юго-востока Западной Сибири.

### Постановка задачи

Современные определения ресурсов УВ выполняются объемно-генетическим методом (бассейновое моделирование) на основе реконструкции геотемпературного режима формирования нефтематеринских отложений.

В некоторых работах при реконструкции температурного режима нефтематеринских отложений осадочных бассейнов континентальной части и шельфа Российской Федерации вековой ход температур земной поверхности не учитывается [4, 5].

В то же время ряд исследователей отмечают осложнение регионального теплового поля Урала и Фенноскандии, вызванное особенностями климатической истории, и учитывают эти особенности при характеристике температурного режима недр конкретных территорий [6, 7 и др.]. Лобовой Г.А. с соавторами, на основе многовариантного палеотемпературного моделирования осадочных разрезов глубоких скважин на территории Томской области, отмечено влияние палеоклимата на термическую историю и реализацию генерационного потенциала баженовской свиты [8].

Ученые, занимающиеся моделированием термической истории осадочных бассейнов Западной Сибири и других нефтегазоносных провинций на основе отечественных компьютерных систем (например, ГАЛО), учитывают вековой ход температур на поверхности Земли [9, 10]. Этот вековой ход температур можно условно назвать «стандартным», т. к. он применяется единообразно для разных региональных палеоклиматических зон Сибири [11].

Известные зарубежные программно-математические комплексы бассейнового моделирования (например, Temis), применяемые для определения ресурсов УВ Приенисейской и Арктической областей Западной Сибири, не учитывают вековой ход температур на поверхности Земли. Эти комплексы не позволяют количественно моделировать глобальные климатические события, приводящие к существенному изменению геотемпературного поля во всем осадочном чехле (по некоторым оценкам, до 15–20 °С). Исходя из этого, вопрос требует специального рассмотрения [12].

Таким образом, современное состояние проблемы теоретического обоснования и экспериментальной оценки влияния мезозойско-кайнозойского климата на реализацию генерационного потенциала нефтематеринских отложений Западной Сибири характеризуется как состояние научного поиска.

Настоящая работа преследовала следующие цели: 1) обобщить данные о мезозойско-кайнозойском климате южной региональной палеоклиматической зоны Западной Сибири (Томская и Новосибирская области), полученные актуалистическими реконструкциями; 2) оценить методом палеотемпературного моделирования влияние векового хода температур поверхности Земли на геотермиче-

ский режим, на степень реализации генерационного потенциала юрских нефтематеринских свит.

**Построение «местного» векового хода температур на поверхности Земли (обобщение результатов актуалистических реконструкций)**

В табл. 1 приводится аналитическая сводка определений среднегодовых температур в мезозое и кайнозое южной климатической зоны Западной Сибири различных авторов.

Шарбатяном А.А. [13] исследовалась возможность образования многолетнемерзлых пород в четвертичное время. При моделировании для района 61° с.ш. (участок широтного течения Оби) на расчетный промежуток 245 тыс. лет назад в качестве верхних граничных условий задачи взят вековой ход температур на поверхности грунта. Вековой ход температур определен автором по кривой векового хода солнечной радиации (по М. Миланковичу) с учетом географических особенностей района (степень континентальности, соседство оледенения и пр.) в этот промежуток времени. Осредненные значения векового хода температур приведены в табл. 1.

Зубаковым В.А. [14] рассмотрена история климата позднего миоцена и плиоцена южной части Западной Сибири и северной части Казахстана. Изучались древнеаллювиальные осадочные толщи и их магнитная восприимчивость. С применением палеомагнитного метода корреляции реконструированы зимние и летние температуры. При этом были использованы палеоботанические и палеоклиматические параметры долины Среднего Иртыша, по В.С. Волковой и Н.А. Кульковой. Осредненные значения векового хода температур южной части Западно-Сибирской низменности в позднем неогене приведены в табл. 1.

Волковой В.С. [15] использован палинологический материал по скважинам и разрезам западной и средней части Западной Сибири, выполнен анализ температур ареалов основных родов флоры, для оценки палеотемператур использован метод построения климатограмм В.П. Гринчука. Построены «тренды» изменения среднезимних, среднелетних и среднегодовых температур в палеогене и неогене. В табл. 1 приведены температуры, соответствующие дискретным определениям значений среднегодовых температур палеогена и неогена Западной Сибири.

Ясаманов Н.А. [16] реконструировал климатические условия отдельных веков юрского, мелового и палеогенового периодов для северной и южной зон Западной Сибири. Для реконструкций использована комплексная методика, в которой главная роль принадлежит данным литологии. Методика включает метод изотопной палеотермометрии (по кислороду органических карбонатов) и магниезильный метод палеотермометрии (по отношению кальция к магнию в органическом кальците). В табл. 1 приведены осредненные определения палеотемператур, начиная с раннеюрской эпохи до середины олигоцена, для южной зоны Западной Сибири.

**Таблица 1.** Среднегодовая температура в мезозое и кайнозое Западной Сибири (северные широты 57–61°)

**Table 1.** Average annual temperature in Mesozoic and Cenozoic eras in Western Siberia (high latitudes 57–61°)

Время, млн лет назад Age, million years ago	Температуры на поверхности Земли, °С Temperature on Earth surface, °C	Авторы, источник данных, Authors, sources of data
0	0	Шарбатян А.А. [13] Sharbatyan A.A. [13]
0,005	+3	
0,030	-2	
0,050	-1	
0,070	-4	
0,090	-1	
0,110	-4	
0,130	-1	
0,148	-4	
0,163	-5	
0,190	-9	
0,210	-6	
0,235	-10	
0,240	0	
2,2	+3	
2,4	0	
3,1	+2	
3,2	+2	
3,8	+14	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
3,9	+8	Зубаков В.А. [14] Zubakov V.A. [14]
4,8	+5	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
5,2	-3	Зубаков В.А. [14] Zubakov V.A. [14]
5,7	+7	
6,3	+10	
7,0	+4	
11,5	+6	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
14	+7	
20	+15	
32	+13	
33	+18	Ясаманов Н.А. [16] Yasmanov N.A. [16]
34	+15	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
42	+11	
46	+8	Гольберт А.В. и др. [11, 17] Gilbert A.V. et al. [11, 17]
48	+17	
50	+15	
55	+17	
58	+24	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
62	+20	
64	+26	Ясаманов Н.А. [16] Yasmanov N.A. [16]
65	+17	Волкова В.С. [15] Volkova V.S. [15]
73	+15	Гольберт А.В. и др. [11, 17] Gilbert A.V. et al. [11, 17]
89	+17	
90	+26	Ясаманов Н.А. [16] Yasmanov N.A. [16]
115	+17	
120	+18	Гольберт А.В. и др. [11, 17] Gilbert A.V. et al. [11, 17]
178	+19	Ясаманов Н.А. [16] Yasmanov N.A. [16]
202	+19	

Гольберт А.В. с соавторами [11, 17] дают развернутую характеристику палеоклимата мелового и палеогенового периодов Сибири, с выделением северо-сибирской, сибирской северной, сибирской южной и северо-казахстанской зон и подзон. Авторы использовали методы изотопной и магнезиальной палеотермометрии, а также данные палеоботаники и климатической интерпретации геологических формаций. В табл. 1 приведены среднегодовые температуры для сибирской южной подзоны начиная с раннемеловой эпохи по эоценовую.

Так, используя опубликованные результаты актуалистических реконструкций, построен «местный» вековой ход температур на поверхности Земли начиная с юрского времени – времени осадконакопления тогурской и баженовской нефтематеринских свит [18]

**Оценка влияния палеоклиматического фактора на геотермический режим и реализацию генерационного потенциала нефтематеринских отложений (палеотемпературное моделирование)**

Оценка влияния векового хода температур на термическую историю материнских отложений выполнена на основе верификации результатов 4-х вариантов моделирования, проведенного для разрезов глубоких скважин в программно-математическом комплексе палеотектонических реконструкций, и палеотемпературного моделирования [19–21]. В первом варианте моделирования палеоклимат не учитывается, но учитываются данные отражательной способности витринита (ОСВ), во втором варианте не учитываются палеоклимат и ОСВ, в третьем варианте палеоклимат учитывается по «стандартному» вековому ходу температур, в четвертом варианте палеоклимат учитывается по «местному» вековому ходу температур.

Используемый программно-математический комплекс моделирования включает решение прямых и обратных задач нестационарной геотермии в условиях седиментации. Первое краевое условие модели определяется температурой поверхности осадконакопления и задается в виде кусочно-линейной функции векового хода температур поверхности Земли, т. е. реализуется учет палеоклимата.

Для решения обратной задачи геотермии – определения теплового потока из основания, используются как измерения пластовых температур, полученные при испытаниях скважин, так и палеотемпературы, рассчитанные по ОСВ. Способ перехода от ОСВ к соответствующей геотемпературе предложен и приведен в [22].

Для количественного анализа вариативности сценариев термической истории материнских отложений для каждого варианта рассчитывается интегральный показатель относительной плотности ресурсов генерированных нефтей  $R$  по формуле [23]:

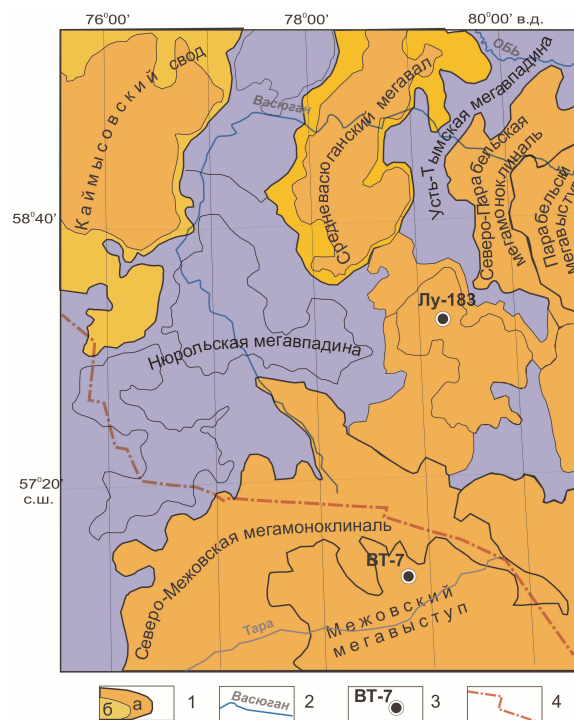
$$R = \sum_{i=1}^n (U_i t_i \cdot 10^{-2}),$$

где  $U_i$  – расчетная температура очага генерации нефти в  $i$ -м интервале геологического времени, °С;  $t_i$  – время действия очага в  $i$ -м интервале, млн лет; количество расчетных временных интервалов  $i=1, \dots, n$ .

Первым основным критерием предпочтительности одного из вариантов палеотемпературного моделирования выступает лучшая согласованность максимума расчетных температур геотермического режима с «реперными» температурами, определенными по ОСВ, а также оптимальная согласованность расчетных геотемператур с «наблюденными» пластовыми. Вторым основным критерием предпочтительности является согласованность наличия и время «работы» очагов интенсивной генерации нефтей с установленной геологоразведкой нефтегазоносностью недр.

**Характеристика объекта исследований**

Моделирование палеогеотемпературных условий для материнских баженовских отложений выполнено для осадочных разрезов глубоких скважин Лугинецкой 183 и Верх-Тарской 7 (рисунок, табл. 2).



**Рисунок.** Обзорная схема территории исследований (на основе [24]): 1 – структуры: а – I порядка, б – II порядка; 2 – реки; 3 – исследуемые скважины: Лугинецкая 183, ВТ-7 – Верх-Тарская 7; 4 – административная граница между Томской и Новосибирской областями

**Figure.** Review scheme of the studied territory (by [24]): 1 – structures of the: а – I order, б – II order; 2 – rivers; 3 – studied wells: Лугинецкая 183, ВТ-7 – Verkh-Tarskaya 7; 4 – administrative boundary between Tomsk and Novosibirsk regions

**Таблица 2.** Характеристики разрезов глубоких скважин**Table 2.** Characteristics of deep well logs

Характеристики Characteristics	Исследуемые скважины Wells under study	
	Лугинецкая 183 Luginetskaya 183	Верх-Тарская 7 Verkh-Tarskaya 7
Забой, м Bottom, m	2500	2821
Отложения на забое (свита) Sediments on bottom (suite)	Средняя юра (тюменская) Middle Jurassic (tyumenskaya)	Палеозой (PZ) Paleozoic
Кровля баженовской свиты, м Bazhenov suite top, m	2313	2408
Мощность баженовской свиты, м Bazhenov suite strength, m	16	58
Результаты испытаний (свита; пласт; тип флюида; дебит, м <sup>3</sup> /сут.) Test results (suite; layer; fluid type; debit, m <sup>3</sup> /day)	Васюганская; Ю <sub>1</sub> <sup>2</sup> ; нефть; 11, 5. Васюганская; Ю <sub>2</sub> <sup>2</sup> ; нефть; 13, 0. Vasyuganskaya; J <sub>1</sub> <sup>2</sup> ; oil; 11, 5. Vasyuganskaya; J <sub>2</sub> <sup>2</sup> ; oil; 13, 0	Васюганская; Ю; нефть; 264,0. Васюганская; Ю; нефть; 40,8. Васюганская; Ю; нефть; 40,8. Vasyuganskaya; J; oil; 264,0. Vasyuganskaya; J; oil; 40,8. Vasyuganskaya; J; oil; 40,8.
Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера; пластовая температура) Measured reservoir temperatures (suite; measurement depth; reservoir temperature)	Куломзинская; 2200 м; 77 °С Тюменская; 2350 м; 84 °С Kulomzinskaya; 2200 м; 77 °С Tyumenskaya; 2350 м; 84 °С	Васюганская; 2488 м; 80 °С Васюганская; 2485 м; 85 °С Васюганская; 2485 м; 86 °С Vasyuganskaya; 2488 м; 80 °С Vasyuganskaya; 2485 м; 85 °С Vasyuganskaya; 2485 м; 86 °С
«Измеренные» температуры по ОСВ (свита; глубина отбора; (R <sub>v</sub> <sup>0</sup> ); температура) «Measured» temperatures by VR* (suite; sampling depth (R <sub>v</sub> <sup>0</sup> ); temperature)	Васюганская; 2345 м; (0,63); 98 °С Vasyuganskaya; 2345 м; (0,63); 98 °С	Тюменская; 2735 м; (0,70); 106 °С Tyumenskaya; 2735 м; (0,70); 106 °С

\*VR is the vitrinite reflectance

В Томской области нефтепромыслы сосредоточены главным образом в Нюрольской мегавпадине и на структурах ее обрамления. Основным источником формирования залежей УВ в ловушках верхнеюрского и мелового нефтегазоносных комплексов (НГК) являются нефтематеринские породы баженовской свиты (J<sub>3v</sub>). Генерационный потенциал этих отложений в пределах этой территории обусловлен высоким содержанием сапропелевого материала (C<sub>орг</sub> до 12 %), их повсеместным распространением и мощностью до 30 м. На Лугинецком месторождении, расположенном в пределах Пудинского мезоподнятия, залежи УВ связаны в основном с верхнеюрскими коллекторами (горизонт Ю<sub>1</sub>).

В Новосибирской области все открытые залежи сосредоточены на севере. Верх-Тарское месторождение нефти является наиболее крупным. Оно приурочено к одноименной локальной структуре, осложняющей Межевский мегавыступ. Промышленно нефтегазоносными комплексами на Верх-Тарском месторождении являются верхнеюрский (горизонт Ю<sub>1</sub>) и палеозойский (пласт М). Основным источником УВ для залежи горизонта Ю<sub>1</sub> служит рассеянное органическое вещество (РОВ) баженовской свиты. Ее мощность в скважинах колеблется от 40 до 58 м. Содержание C<sub>орг</sub> достигает 15–20 %.

#### Вариативность результатов палеорекоstructions геотермического режима баженовской свиты и их анализ

Схема расчета палеотемператур состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению температур  $T$ , в скважине рассчитывается тепловой поток  $q$  через поверхность подстилающего основания, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе с известным значением  $q$  решаются прямые задачи геотермии – непосредственно рассчитываются температуры  $U$  в любых заданных точках осадочной толщи  $Z$  в любые заданные моменты геологического времени  $t$ .

Решение прямых задач геотермии выполнено для 46-ти ключевых моментов геологического времени, соответствующих времени начала/завершения формирования каждой свиты и точкам «излома» векового хода температур на земной поверхности (табл. 3 и 4). По геотемпературному критерию главной зоны нефтеобразования (ГЗН) [25] выделены очаги интенсивной генерации баженовских нефтей. Пороговая температура очагов генерации нефти баженовской свиты принята 85 °С, так как рассеянное органическое вещество в этих отложениях сапропелевого типа.



**Таблица 3.** Расчетные геотемпературы баженовской свиты скважины Лугинецкая 183

**Table 3.** Design geotemperatures of Bazhenov formation of well Luginetskaya 183

Время, млн лет назад Age, million years ago	Вековой ход температур на поверхности Земли, °C Secular temperature curve on Earth surface, °C		Глубина положения баженовской свиты, м Depth of Bazhenov formation location, m	Геотемпературы баженовской свиты, °C Geotemperatures of Bazhenov formation, °C			
	«Стандартный» [9, 10] «Standard» [9, 10]	«Местный» [18] «Local» [18]		Без учета палеоклимата (Вариант 1) Without considering paleoclimate (Version 1)	Без учета ОСВ (Вариант 2) Without considering paleoclimate, without considering VR (Version 2)	Учет палеоклимата, «стандартный» ход температуры (Вариант 3) Considering paleoclimate, «standard» temperature curve (version 3)	Учет палеоклимата, «местный» ход температуры (Вариант 4) Considering paleoclimate, «local» temperature curve (version 4)
0	+2	0	2321	89	82	83	84
0,005	+2	+3	2320	89	82	83	84
0,03	+2	-2	2320	89	82	83	83
0,05	+2	-1	2320	89	82	83	83
0,07	+2	-4	2319	89	82	84	83
0,09	+2	-1	2319	89	82	83	84
0,11	+2	-4	2319	89	82	83	83
0,13	+2	-1	2319	89	82	83	83
0,15	+2	-4	2318	89	82	83	83
0,19	+2	-9	2318	89	82	83	84
0,21	+2	-6	2317	88	82	83	84
0,235	+2	-10	2317	88	82	83	84
0,24	+2	0	2317	88	82	83	85
1,64	+2	+1	2296	88	82	84	86
3,1	+2	+2	2295	88	81	85	87
3,2	+2	+2	2295	88	81	86	88
3,8	+5	+12	2295	87	81	87	86
4,7	+4	+3	2295	87	81	83	86
5,2	+4	-3	2294	87	81	82	85
5,7	+4	+7	2294	87	81	83	92
6,3	+4	+10	2294	87	81	83	93
7	+4	+4	2294	88	81	84	89
20	+7	+15	2294	88	81	87	99
24	+8	+16	2294	88	81	85	99
31,5	+9	+17	2218	85	78	87	98
32,3	+10	+16	2210	84	77	87	97
34	+12	+15	2200	84	77	87	96
37,6	+15	+14	2178	82	76	95	93
41,7	+19	+12	2154	82	75	95	90
42	+20	+11	2152	81	75	95	89
46	+21	+8	2129	81	74	94	84
54,8	+21	+19	2077	79	72	92	96
58	+20	+24	2058	78	72	91	98
61,7	+20	+22	2037	76	70	89	95
73	+20	+15	1899	71	65	83	83
73,2	+20	+16	1897	70	65	83	83
86,5	+20	+22	1735	64	59	78	83
89,8	+20	+22	1694	62	57	77	83
90	+20	+23	1692	62	57	77	83
91,6	+20	+22	1673	59	55	74	80
114,1	+20	+21	870	31	28	49	49
118	+20	+19	869	30	28	49	48
120,2	+20	+19	869	29	28	49	48
132,4	+20	+19	319	11	10	32	30
136,1	+20	+19	245	9	8	30	27
145,8	+20	+19	8	0,3	0,3	23	19
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м² Design thermal flow from the base, mW/m²				56	51	51	54

Примечание: заливкой показаны температуры главной зоны нефтеобразования (ГЗН), красной заливкой – абсолютные палеотемпературные максимумы ГЗН, коричневой – относительные палеотемпературные максимумы ГЗН.  
Note: temperatures of the main oil generation zone (MOGZ) are filled with: red – absolute paleotemperature maximum of MOGZ; brown – relative paleotemperature maximum of MOGZ

**Таблица 4.** Расчетные геотемпературы баженовской свиты скважины Верх-Тарская 7

**Table 4.** Design geotemperatures of Bazhenov formation of well Verkh-Tarskaya 7

Время, млн лет назад Age, million years ago	Вековой ход температур на поверхности Земли, °C Secular temperature curve on Earth surface, °C		Глубина положения баженовской свиты, м Depth of Bazhenov formation location, m	Геотемпературы баженовской свиты, °C Geotemperatures of Bazhenov formation, °C			
	«Стандартный» «Standard»	«Местный» «Local»		Вариант/Version			
				1	2	3	4
0	+2	0	2441	88	82	85	82
0,005	+2	+3	2441	88	82	85	82
0,03	+2	-2	2441	88	82	85	81
0,05	+2	-1	2440	88	82	85	81
0,07	+2	-4	2440	88	82	85	80
0,09	+2	-1	2440	88	82	85	81
0,11	+2	-4	2440	88	82	85	81
0,13	+2	-1	2439	88	82	85	80
0,15	+2	-4	2439	88	82	85	81
0,19	+2	-9	2439	88	82	85	82
0,21	+2	-6	2438	88	82	85	83
0,235	+2	-10	2438	88	82	85	82
0,24	+2	0	2438	88	82	85	84
1,64	+2	+1	2421	87	82	84	84
3,1	+2	+2	2421	87	82	84	86
3,2	+2	+2	2420	87	82	85	87
3,8	+5	+12	2420	87	82	87	93
4,7	+4	+3	2420	87	82	86	86
5,2	+4	-3	2420	87	82	86	87
5,7	+4	+7	2420	87	82	86	90
6,3	+4	+10	2420	87	82	86	91
7	+4	+4	2420	87	82	86	87
20	+7	+15	2419	87	82	89	98
24	+8	+16	2419	87	81	90	99
31,5	+9	+17	2302	82	77	86	95
32,3	+10	+16	2289	82	77	87	94
34	+12	+15	2276	81	76	88	92
37,6	+15	+14	2250	80	75	90	90
41,7	+19	+12	2219	79	74	94	87
42	+20	+11	2218	79	74	94	86
46	+21	+8	2203	78	73	94	82
54,8	+21	+19	2169	77	72	93	92
58	+20	+24	2160	76	72	92	97
61,7	+20	+22	2149	76	71	91	94
73	+20	+15	2045	72	67	87	84
73,2	+20	+16	2043	72	67	87	84
86,5	+20	+22	1981	69	65	85	87
89,8	+20	+22	1819	63	59	79	82
90	+20	+23	1815	63	59	79	82
91,6	+20	+22	1786	59	55	76	79
114,1	+20	+21	940	31	29	49	50
118	+20	+19	939	31	29	49	48
120,2	+20	+19	938	31	29	49	48
132,4	+20	+19	265	9	8	28	27
136,1	+20	+19	214	7	6	26	25
145,8	+20	+19	29	1	1	21	20
Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м² Design thermal flow from the base, mW/m²				52	49	49	49

Анализ значений теплового потока из основания осадочного разреза (табл. 3 и 4) показывает, что неучет палеоклимата (Вариант 1) приводит к существенно большим расчетным значениям плотности теплового потока – увеличение до 5–10 %. Это объясняется фактическим отсутствием в этом варианте солнечного источника тепла в модели палеотемпературных реконструкций. В этом случае минимизация разницы расчетных и наблюдаемых геотемператур «потребовала» большего значения плотности теплового потока из основания  $q$ . Анализ термической истории отложений баженовской свиты в разрезах скважин свидетельствует о том, что в Варианте 1 (без учета палеоклимата) материнская свита «пережила» самую короткую и самую холодную главную фазу нефтеобразования (ГФН). Если при этом не учитывать и данные ОСВ – Вариант 2, то баженовская свита практически как бы и не входила в ГЗН. Последнее не согласуется со вторым основным критерием предпочтительности – не согласуется с установленной нефтегазоносностью пласта Ю<sub>1</sub> (табл. 2).

В Вариантах 3 и 4 с учетом палеоклимата баженовская свита имеет «богатые», но разные термические истории ГФН. Главные фазы нефтеобразования этих вариантов различаются геологическим временем проявления не только абсолютного максимума палеотемператур, но и временем проявления относительных максимумов геотемператур в геологическом прошлом. Эта разница в термической истории ГФН имеет существенное значение с точки зрения сингенетичности созревания РОВ материнских отложений, генерации УВ и формирования структурных планов площадей нефтесбора, локальных ловушек.

Интересно отметить (табл. 3 и 4) кажущуюся синхронность изменения геотемператур материнской свиты и палеоклимата (векового хода температуры на земной поверхности). Однако эта синхронность наблюдается при шаге дискретизации геологического времени в млн лет. При более детальном шаге дискретизации проявляется инерционность геотемператур баженовской свиты к изменению палеоклимата.

Сопоставление расчетных и измеренных геотемператур в скважинах (табл. 5) показывает, что в Варианте 1 (без учета палеоклимата) «невязка» (разница) решения обратной задачи геотермии достигает 14–17 °С, что является неприемлемым результатом, свидетельствующим о неадекватности параметрического описания модели палеорекопструкций. Далее, если данные ОСВ исключить (Вариант 2), имеет место минимальная «невязка». Эта согласованность кажущаяся, т. к. получаемая при этом термическая история (табл. 3 и 4) не согласуется с результатами испытаний пласта Ю<sub>1</sub>.

В случае учета палеоклимата и данных ОСВ (Варианты 3 и 4) «невязки» решений обратных задач геотермии приемлемы, т. к. измеренные и расчетные геотемпературы имеют погрешность порядка ±2 °С. Можно отметить, что «невязки» в случае учета палеоклимата по «местному» ходу температур на земной поверхности (Вариант 4) заметно меньше.

**Таблица 5.** Сопоставление измеренных и расчетных геотемператур

**Table 5.** Comparison of measured and design geotemperatures

Глубина, м Depth, m	Измеренные температуры, °С Measured temperatures, °C	Способ измерения Measuring method	Вариант/Version							
			1		2		3		4	
			Расчетные Design	Разница Difference	Расчетные Design	Разница Difference	Расчетные Design	Разница Difference	Расчетные Design	Разница Difference
°C										
Скважина Лугинецкая 183/Luginetskaya 183										
2200	77	Пластовые Reservoir	85	+8	78	+1	80	+3	80	+3
2350	84	Пластовые Reservoir	90	+6	83	-1	85	+1	85	+1
2345	98	По ОСВ By VR	84	-14	-	-	93	-5	94	-4
Скважина Верх-Тарская 7/Verkh-Tarskaya 7										
2485	85	Пластовые Reservoir	89	+4	84	-1	86	+1	83	-2
2485	86	Пластовые Reservoir	89	+3	84	-2	86	0	83	-3
2488	80	Пластовые Reservoir	89	+9	84	+4	86	+6	83	+3
2735	106	По ОСВ By VR	89	-17	-	-	99	-7	108	+2

**Таблица 6.** Оценка относительной плотности ресурсов генерированных баженовских нефтей для вариантов учета векового хода температур на поверхности Земли

**Table 6.** Estimation of relative density of the generated Bazhenov oil resources for versions of considering secular temperature curve on Earth surface

Вариант Version	Расчетные ресурсы, усл. ед. Design resources, arb. units	Количество расчетных временных интервалов (n) Number of design time intervals (n)	Периоды работы палеоочага генерации нефти, млн лет назад Periods of operation of oil generation paleo-origin, million years ago	Время работы палеоочага, млн лет Time of paleo-origin operation, million years	Максимальные геотемпературы палеоочага, °С Peak geotemperatures of paleo-origin, °C
Скважина Лугинецкая 183/Luginetskaya 183					
1	28	25	31,5–0,03	31,5	89
2	-	-	-	-	-
3	49	15	61,7–20; 3,8–3,1	42,4	95
4	67	22	61,7–0,24	61,5	99
Скважина Верх-Тарская 7/Verkh-Tarskaya 7					
1	25	24	24–0	24	88
2	0	-	-	0	-
3	79	35	86,5–3,1; 0,24–0	83,6	94
4	59	20	86,5–73,2; 61,7–46,0; 42,0–1,64	69,4	99

Расчет относительной плотности генерированных баженовских нефтей (табл. 6) дает минимальные значения плотности при неучете палеоклимата – Вариант 1. Если при этом еще проигнорировать данные ОСВ (Вариант 2), то расчет не дает генерированных ресурсов. В Вариантах 3 и 4 (с учетом палеоклимата) расчетные ресурсы заметно отличаются – до 30–40 %. Для Верх-Тарской площади (Новосибирская область) при учете палеоклимата по «местному» ходу температур получены меньшие ресурсы, чем при учете палеоклимата по «стандартному» вековому ходу. В то время как для Лугинецкой площади (Томская область) получено обратное соотношение величин ресурсов Вариантов 3 и 4.

#### Выводы

1. Проведено географическое и геохронологическое обобщение данных о вековом ходе температур на поверхности Земли южной палеоклиматической зоны Западной Сибири, полученных на основе сравнительно-исторического анализа литологии осадочных толщ, ареалов флоры, данных изотопной и магнезиальной термометрии. Для южной палеоклиматической зоны определен «местный» вековой ход температур на земной поверхности начиная с юрского времени.
2. Методом палеотемпературного моделирования получена оценка существенного влияния

палеоклимата на геотермический режим и степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты, формирующих залежи углеводородов нефтегазоносных комплексов юго-востока Западной Сибири. Установлено, что неучет палеоклимата не позволяет адекватно восстановить термическую историю материнских отложений. Такой неучет может занижать до 2-х и более раз величины ресурсов, рассчитанных объемно-генетическим методом.

3. Использование «местного» векового хода температур на поверхности Земли повышает эффективность технологии определения прогнозных ресурсов, позволяет более корректно учесть историю главной фазы нефтеобразования и не завывать/занижать (до 30–40 %) расчетные ресурсы.
4. Продемонстрирована преемственность и научно-практическая значимость сочетания сравнительно-исторического (актуалистического) метода классической геологии и нового метода разведочной геофизики – геотермии – в исследованиях по совершенствованию технологий оценки ресурсов углеводородов.
5. Обоснована необходимость расширения методологической базы геологии, разработки новых методик, ресурсоэффективных технологий в области поисков, разведки недр и добычи углеводородов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лайель Ч. Основные начала геологии. – М.: Издание А.И. Глазунова, 1868. – Т. 1. – 659 с.; Т. 2. – 562 с.
2. Геотермия арктических морей / М.Д. Хуторской, В.Р. Ахмедзянов, А.В. Ермаков, Ю.Г. Леонов, Л.В. Подгорных, Б.Г. Поляк, Е.А. Сухих, Л.А. Цыбуля / отв. ред. Ю.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2013. – 232 с.
3. Сунгурова О.Г., Мазуров А.К., Исаев В.И. Ресурсоэффективная стратегия поисков залежей нефти в доюрском основании Западной Сибири // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 147–154.
4. Моделирование процессов генерации, миграции и аккумуляции углеводородов в юрских и меловых комплексах Енисей-Хатангского бассейна / П.И. Сафронов, С.В. Ершов, Н.С. Ким, А.Н. Фомин // Геология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 48–55.
5. Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. Опыт применения технологии бассейнового моделирования в ОАО «НК-Роснефть» для оценки перспектив нефтегазоносности акваторий и выбора новых направлений геологоразведочных работ // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 11. – С. 14–17.
6. Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Тагирова Ч.Д. Методика расчета глубинных температур с учетом исправленных на влияние палеоклимата значений теплового потока // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 9. – С. 1426–1435.
7. Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? / C. Vogt, D. Mottaghy, V. Rath, G. Marquart, L. Dijkshoorn, A. Wolf, C. Clauser // Geophysical Journal International. – 2014. – V. 199. – P. 829–843.
8. Влияние палеоклимата на геотермический режим и нефтегенерационный потенциал баженовской свиты (на широтах Томской области) / Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, К.А. Криницина, Ю.Г. Останкова // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 45–50.
9. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика. – 2006. – № 3. – С. 101–120.
10. Галушкин Ю.И., Ситар К.А., Куницина А.В. Численное моделирование преобразования органического вещества осадочных горных пород северо-восточного шельфа Сахалина // Океанология. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 521–531.
11. Палеоклиматы Сибири в меловом и палеогеновом периодах / А.В. Гольберт, К.Н. Григорьева, Л.Л. Ильенок, Л.Г. Маркова, А.В. Скуратенко, Ю.В. Тесленко. – М.: Недр, 1977. – 107 с.
12. Историко-геологическое моделирование процессов нефтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря (бассейновое моделирование) / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, Н.А. Малышев, П.И. Сафронов, С.А. Гуськов, С.В. Ершов, В.А. Казаненков, Н.С. Ким, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, В.Р. Лившиц, А.А. Поляков, М.Б. Скворцов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1179–1226.
13. Шарбатян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. – М.: Наука, 1974. – 123 с.
14. Зубаков В.А. Глобальные климатические события неогена. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 223 с.
15. Волкова В.С. Стратиграфия и тренд палеотемператур в палеогене и неогене Западной Сибири (по данным палинологии) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 7. – С. 906–915.
16. Ясаманов Н.А. Реконструкции климатических условий мезозоя и кайнозоя Юга СССР // Методы реконструкции палеоклиматов. – М.: Наука, 1985. – С. 179–184.

17. Гольберт А.В. Основы региональной палеоклиматологии. – М.: Недра, 1987. – 222 с.
18. Исаев В.И., Рылова Т.Б., Гумерова (Искоркина) А.А. Палеоклимат Западной Сибири и реализация генерационного потенциала нефтематеринских отложений // Известия ТПУ. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 93–102.
19. Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems // Geology of the Pacific Ocean. – 1996. – V. 12. – № 3. – P. 523–536.
20. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
21. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавпадины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
22. Isaev V.I., Fomin A.N. Loci of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuro'l'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2006. – V. 47. – № 6. – P. 734–745.
23. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых НГК Усть-Тымской мегавпадины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
24. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
25. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.

Поступила 23.04.2015 г.

UDC 553.98:553.041:552.578:550.8.05

## DEVELOPMENT OF THE EFFECTIVE TECHNIQUE FOR ASSESSING HYDROCARBON RESOURCES APPLYING THE COMPARATIVE-HISTORICAL METHOD AND GEOTHERMAL AS A NEW METHOD OF EXPLORATION GEOPHYSICS

**Albina A. Iskorkina,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: iskorkina.a@mail.ru

**Irina V. Brylina,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: ibrylina@yandex.ru

**Alla A. Kornienko,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: allaphil@tpu.ru

**Valeriy I. Isaev,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: isaevi@tpu.ru

**The relevance of the research** is caused by the need to improve a technique of assessing the hydrocarbon resources by the volume and genetic method based on paleoreconstruction of geotemperature mode of petromaternal deposits.

**The main aim** of the research is to assess the influence of the century course of temperatures on Earth surface on geothermal mode of petromaternal deposits of the southeast of Western Siberia, on the extent of realization of their generative potential.

**Objects of researches:** average annual temperatures in the Mesozoic and the Cenozoic of the southern paleoclimatic zone of Western Siberia, Bazhenov deposits of the Mesozoic and Cenozoic section opened with deep wells at latitudes of Tomsk and Novosibirsk areas.

**Methods of researches:** the analytical report of reconstruction of the century course of temperatures on a day surface in the Mesozoic Cenozoic executed with application of an actualistic method; a method of paleotemperature modeling for a quantitative assessment of influence of a paleoclimate factor on the geothermal mode of maternal deposits and intensity of generation of hydrocarbons.

**Research results.** The authors have carried out the geographical and geochronological generalization of the data on the century course of temperatures on Earth surface of the southeast of Western Siberia published in the period of 1974–2011. The data were obtained by a number of authors on the basis of the comparative-historical analysis of sedimentary thicknesses lithology, flora areas, and materials of isotope and magnesia thermometry. For the southern paleoclimatic zone (Tomsk, Novosibirsk and Omsk areas) the «local» century course of temperatures on a terrestrial surface, since the Jurassic time, was constructed. By geotemperature criterion the authors allocated the centers of intensive generation of Bazhenov oil by paleotemperature modeling of sedimentary cover, including petromaternal deposits; calculated and analyzed the distribution of oil resources relative density. The quantitative assessment of paleoclimate influence on geothermal mode and extent of realization of generative capacity of the Bazhenov suite, the hydrocarbons of petroleum potential complexes of Tomsk and Novosibirsk oil fields forming deposits was obtained. It is shown that without considering paleoclimate it is impossible to restore adequately thermal history of maternal deposits that may underestimate to 2 times or more the value of the estimated resources by a volume and genetic method. Use of the «local» century course of temperatures on the Earth surface increases the efficiency of technology for defining the expected resources, allows considering more correctly the history of the main phase of oil formation, both without overestimating/underestimating (to 30–40 %) the settlement resources. The paper demonstrates the continuity and scientific and practical importance of combination of a comparative-historical (actualistic) method of classical geology and a new method of exploration geophysics – geothermics – when solving the problems of assessing hydrocarbon resources.

**Key words:**

Effective technique, resources of hydrocarbon, paleoclimat, actualistic method, bazhenov suite, method of paleotemperature modeling, southeast of Western Siberia.

**REFERENCES**

- Layel Ch. *Osnovnye nachala geologii* [Main beginnings of geology]. Moscow, A.I. Glazunova of Publ., 1868. 562 p.
- Khutorskoy M.D., Akhmedzyanov V.R., Ermakov A.V., Leonov Yu.G., Podgornyykh L.V., Polyak B.G., Sukhikh E.A., Tsybulya L.A. *Geotermiya arkticheskikh morey* [Geothermic of the Arctic seas]. Ed. by Yu.G. Leonov. Moscow, GEOS Publ., 2013. 232 p.
- Sungurova O.G., Mazurov A.K., Isaev V.I. Resursoeffektivnaya strategiya poiskov zalezhey nefiti v doyrskom osnovanii Zapadnoy Sibiri [Resource efficient search strategies of oil deposits in the pre-Jurassic base of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 147–154.
- Safronov P.I., Ershov S.V., Kim N.S., Fomin A.N. Modelirovanie protsessov generatsii, migratsii i akkumulyatsii uglevodorodov v yurskikh i melovykh kompleksakh Enisey-Hatangского бассейна [Modeling of generation, migration and accumulation of hydrocarbons in the Jurassic and cretaceous complexes of the Yenisei-Hatangsky pool]. *Geologiya nefiti i gaza – Geology of oil and gas*, 2011, no. 5, pp. 48–55.
- Malyshev N.A., Obmetko V.V., Borodulin A.A. Opyt primeneniya tekhnologii basseynovogo modelirovaniya v OAO «NK-Rosneft» dlya otsenki perspektiv neftegazonosnosti akvatorii i vybora novykh napravleniy geologorazvedochnykh rabot [Experience of applying the basin modeling technology in JSC Oil Company Rosneft to assess the prospects of oil-and-gas content of water areas and to select new directions in prospecting works]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2012, no. 11, pp. 14–17.
- Golovanova I.V., Salmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Metodika rascheta glubinykh temperatur s uchetom ispravlenykh na vliyaniye paleoklimata znacheniy teplovogo potoka [Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1426–1435.
- Vogt C., Mottaghy D., Rath V., Marquart G., Dijkshoorn L., Wolf A., Clauser C. Vertikal variation in heat flow on the Kola Peninsula: palaeoclimate or fluid flow? *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 199, pp. 829–843.
- Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsina K.A., Ostantkova Yu.G. Vliyaniye paleoklimata na geotermicheskiy rezhim i neftegeneratsionnyy potentsial bazhenovskoy svity (na shirotakh Tomskoy oblasti) [Influence of paleoclimate on geothermal regime and oil generation potential of the Bazhenov Formation (at latitudes Tomsk region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 45–50.
- Lopatin N.V. Kontseptsiya neftegazovykh generatsionno-akkumulyatsionnykh sistem kak integriruyushchee nachalo v osnovanii poiskovo-razvedochnykh rabot [The concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating beginning in justification of exploration]. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120.
- Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsina A.V. Chislennoye modelirovaniye preobrazovaniya organicheskogo veshchestva osadochnykh gornyykh porod severo-vostochnogo shelfa Sakhalina [Numerical modeling of sedimentary rock organic substance transformation in the northeast shelf of Sakhalin]. *Oceanology*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 521–531.
- Golbert A.B., Grigoreva K.N., Ilenok L.L., Markova L.G., Skuratenko A.B., Teslenko Yu.V. *Paleoklimaty Sibiri v melovom i paleogenovom periodakh* [Paleoclimate of Siberia in the cretaceous and Paleogene periods]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 107 p.
- Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Guskov S.A., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B. Istoriko-geologicheskoe modelirovaniye protsessov naftidogeneza v mezozoysko-kaynozoyском osadochnom basseyne Karskogo morya (basseynovoe modelirovaniye) [Historical and geological modeling of naftidogenesis in Mesozoic-Cenozoic sedimentary basin of the Kara Sea (basin modeling)]. *Geologiya i Geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 1179–1226.
- Sharbatian F.F. *Ekstremalnye otsenki v geotermii i geokriologii* [Extreme estimates in the geothermic and cryopedology]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 123 p.
- Zubakov V.A. *Globalnye klimaticheskie sobytiya neogena* [Global climatic events of the Neogene]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990. 223 p.
- Volkova V.S. Stratigrafiya i trend paleotemperatur v paleogene i neogene Zapadnoy Sibiri (po dannym palinologii) [Stratigraphy and paleotemperatures trend in the Paleogene and Neogene of Western Siberia (according to palynology)]. *Geologiya i Geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 7, pp. 906–915.
- Yasamanov N.A. Rekonstruktsii klimaticheskikh usloviy mezozoya i kaynozoya Yuga SSSR [Reconstruction of climatic conditions of the Mesozoic and Cenozoic of the South of the USSR]. *Metody rekonstruktsii paleoklimatov* [Methods of reconstruction of paleoclimate]. Moscow, Nauka Publ., 1985. pp. 179–184.
- Golbert A.V. *Osnovy regionalnoy paleoklimatologii* [Bases of regional paleoclimatology]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 222 p.
- Isaev V.I., Rylova T.B., Gumerova A.A. Paleoklimat Zapadnoy Sibiri i realizatsiya generatsionnogo potentsiala neftematerniskikh otlozheniy [Paleoclimate of Western Siberia and realization of generative potential of petromaternal deposits]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 93–102.
- Isaev V.I., Volkova N.A., Nim T.V. Solution of direct invers sedimentation heat-flow problems. *Geology of the Pacific Ocean*, 1996, vol. 12, no. 3, pp. 523–536.
- Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Starostenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
- Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Neftegazonosnost nizhnemelovykh rezervuarov nyurolskoy megavpadiny [Petroleum potential of the Lower Cretaceous reservoirs of Nyuroł'ka megadepression]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33.
- Isaev V.I., Fomin A.N. Loci of generation of bazhenov- and togur-type oils in the southern Nyuroł'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 734–745.
- Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefiti yursko-melovykh neftegazonosnykh kompleksov Ust-Tym'skoy megavpadiny [Probable oil resource localization for Jurassic and Cretaceous oil-and-gas complexes of the Ust-Tym megadepression]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
- Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoy'skikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil-and-gas petroleum potential of the Mesozoic-Cenozoic deposits in southeastern regions of West Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2002. 253 p.
- Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [The model of katagenesis of organic matter (by the example of Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.

Received: 23 April 2015.

УДК 697.34

## ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ СЕТЕЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Москалёв Иван Леонидович,**

начальник Управления гидравлических режимов и технической экспертизы  
ОАО «ТомскРТС», аспирант каф. атомных и тепловых электростанций  
Энергетического института Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Россия, 634050,  
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: moskalew@tpu.ru

**Литвак Валерий Владимирович,**

д-р техн. наук, профессор каф. атомных и тепловых электростанций  
Энергетического института Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Россия, 634050,  
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: litvak@tpu.ru

*Совершенствование системы ремонтного обслуживания становится все более актуальной задачей различных отраслей производства. Величина ущерба от недоотпусков тепловой энергии потребителям значительно сокращается при снижении времени с момента возникновения повреждения в системах централизованного теплоснабжения до обнаружения и устранения этого повреждения. Таким образом, для сокращения ущерба и успешного решения задач ресурсосбережения немалое значение имеет ограничение времени восстановительного периода. В этом состоит актуальность поставленной задачи. Развернутая в Российской Федерации в течение последних лет работа в области ресурсосбережения придает этой задаче государственное значение.*

**Цель работы:** анализ ремонтно-эксплуатационного порядка бесперебойных поставок тепловой энергии потребителям систем централизованного теплоснабжения крупных городов РФ; классификация дефектов, создание и обработка базы данных по повреждаемости оборудования систем централизованного теплоснабжения и разработка мер по сокращению последствий повреждений.

**Методы исследования.** Используются современные методы статистической обработки результатов экспериментальных исследований; методы теории вероятностей и математической статистики. При создании баз данных о повреждаемости и работе с ними использовались программные пакеты данных Microsoft Access и Excel, Autodesk AutoCAD, Statistica.

**Результаты.** На основании обработки данных по системам теплоснабжения 21 города РФ проведен анализ повреждаемости: по срокам эксплуатации; по элементам системы теплоснабжения; по причинам возникновения; по элементам и в зависимости от способа прокладки. Выявлены «слабые» места и установлены причины повреждаемости элементов систем централизованного теплоснабжения.

### **Ключевые слова:**

*Тепловая сеть, тепловая камера, инцидент, дефект, коррозия.*

### **Объект исследования**

Анализ повреждаемости элементов систем теплоснабжения городов по материальной характеристике систем централизованного теплоснабжения (СЦТ), климатическим условиям, продолжительности отопительного периода представлен раздельно для выборок по каждому региону (таблица). Трубопроводы с обнаруженными дефектами классифицируются в группы по признакам: диаметры труб, способы прокладки, сроки службы. Также они отличаются условиями эксплуатации (режимы использования, износ, качество используемой сетевой воды и т. д.) и качеством ремонта. В связи с этим представленные далее результаты позволяют сделать пока только «качественную» оценку надежности анализируемых узлов.

### **Проведение эксперимента**

Характеристики СЦТ городов приняты по сведениям, опубликованным на официальных сайтах Администрации соответствующих городов и по материалам обследований, проведенных при выполнении настоящего исследования [1–3].

В соответствии с общепринятой терминологией по надежности в энергетике термин «дефект» может быть применен к «отказу», «аварии» и «инциденту». Если повреждения оборудования или трубопроводов не привели к прекращению теплоснабжения потребителей в отопительный период на срок более 36 часов (36 часов включительно), то такие повреждения должны быть отнесены к инцидентам [4–7]. Термин «отказ» в этом случае не может быть объективно применен, а учет таких происшествий директивной статистикой не предусмотрен. В результате отчетные материалы по надежности содержат лишь те сведения, которые отвечают условию «отказ», а вычисляемые показатели надежности недоучитывают иные формы повреждений.

Следует обратить внимание на то, что количество официально учитываемых отказов в тепловых сетях ничтожно мало, а определение показателей надежности по ним приводит к иллюзии абсолютной надежности [8].

В отличие от существующего подхода в настоящей работе учитываются все имевшие место «де-

фекты», учтенные в оперативной и ремонтной документации предприятий тепловых сетей. Кроме того, расчет показателей надежности (частот инцидентов) произведен отдельно для инцидентов, имевших место в отопительный и межотопительный периоды, во время работ по испытанию трубопроводов, включающих в себя гидравлические и температурные испытания.

**Таблица.** Анализируемые системы теплоснабжения и теплофикации крупных городов РФ

**Table.** The analyzed heat supply systems in large cities of the RF

Город/City	Протяженность сети (в двухтрубном исполнении), км Network extent (in two-pipe version), km	Материальная характеристика*, м <sup>2</sup> Material characteristics*, m <sup>2</sup>	Установленная мощность источников теплоснабжения, Гкал/ч, Installed capacity of heat supply sources, Gcal/h	Продолжительность отопительного периода, сут. Heating period duration, day
Новосибирск Novosibirsk	1670	542299	5942	230
Екатеринбург, Yekaterinburg	1606	475107	6800	230
Нижний Новгород Nizhny Novgorod	1417	321147	6108	215
Самара/Samara	956	218914	6025	203
Омск/Omsk	1164	511726	5628	221
Уфа/Ufa	1009	369631	7451	213
Пермь/Perm	793	342704	3271	229
Воронеж/Voronezh	800	235460	2274	196
Саратов/Saratov	525	306610	2744	196
Тольятти/Togliatti	639	554495	4981	203
Тюмень/Tyumen	547,5	246375	2233	225
Барнаул/Barnaul	610	271008	1441	221
Ульяновск/Ulyanovsk	577	275741	852	212
Ярославль/Yaroslavl	354	171784	1500	221
Хабаровск Khabarovsk	780	254746	3110	211
Оренбург/Orenburg	453	254239	1761	202
Томск/Tomsk	590	197655	2580	236
Набережные Челны Naberezhnye Chelny	318	159692	960	215
Липецк/Lipetsk	538	208334	1112	202
Пенза/Penza	346	121636	1168	207
Нижневартовск Nizhnevartovsk	300	134499	1871	250

\*Примечание: Материальная характеристика – это сумма произведения значений наружных диаметров трубопроводов отдельных участков тепловой сети (м) на длину этих участков (м).  
\*Note: material characteristic is the sum of the product of pipeline outer diameter values at separate areas of heat network (m) by the length of these areas (m).

В большинстве теплоснабжающих организаций представленных городов отсутствуют организованные базы данных по инцидентам. Это препятству-

ет выявлению достоверного уровня большинства показателей надежности систем теплоснабжения (интенсивность повреждаемости, интенсивность восстановления и др.).

В процессе такого анализа выявляются наиболее распространенные виды и причины повреждений, например, распределение инцидентов по элементам тепловых сетей и зависимость удельного количества повреждений от срока эксплуатации тепловых сетей.

Кроме того, магистральные сети рассмотрены в полном объеме представленных данных по инцидентам, а внутриквартальные – лишь частично. Этот сектор систем теплоснабжения более детально предполагается изучить позднее.

Действующая в настоящее время методика учета и сбора информации о повреждениях в тепловых сетях и расчета показателей надежности на их основе (интенсивность отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и др.) [9–11] не предусматривает учета повреждений, выявленных при проведении испытаний.

При определении долевых величин дефектов за 100 % принято общее количество дефектов за рассматриваемый период для объектов теплоснабжения каждого анализируемого типа. Доля каждого вида определена как отношение количества дефектов этого вида к общему числу дефектов. Таким образом, объекты могут быть сопоставимы по интенсивности повреждаемости в каждой группе [12–18].

### Основные результаты исследования и обсуждение

#### Сроки эксплуатации тепловых сетей

Как было отмечено выше, единственным источником данных о повреждениях тепловых сетей являются материалы годовых отчетов, которые, естественно, не могут в полной мере охарактеризовать сложившуюся ситуацию. Некоторые важные данные отсутствуют, некоторые из предоставленных данных вызывают сомнения, в частности некоторые сведения об инциденте на трубопроводе повторяются (местонахождение инцидента, количество объектов, причина отключения), отличие лишь во времени отключения (продолжительности ремонта).

Тепловые сети представленных городов имеют большой срок эксплуатации. Они сооружены в основном до 1989 г. В среднем сети, находящиеся сейчас в эксплуатации, спроектированы до 1985 г. На рис. 1 приведено распределение сетей по срокам ввода в эксплуатацию.

Из диаграммы можно сделать вывод, что большая часть всех трубопроводов тепловых сетей (71 %) имеют срок службы более 21 года, а 35 % – свыше 30 лет.

Это связано в первую очередь с тем, что в течение последних 20 лет финансирование ремонтных работ по устранению физического износа оставалось ничтожно малым. Прекращена государствен-

ная бюджетная поддержка. Это привело к тому, что значительная доля оборудования ТС работает на пределе гарантийного ресурса [19].

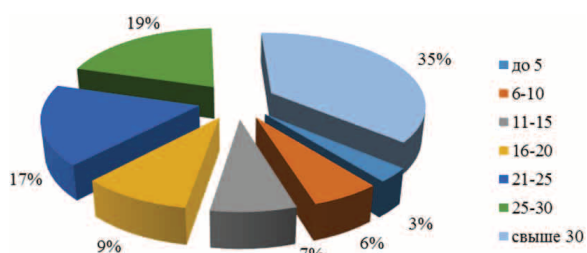


Рис. 1. Срок эксплуатации трубопроводов тепловых сетей (%)

Fig. 1. Lifetime of heat network pipeline (%)

Большая часть российской теплосетевой инфраструктуры создана в 60–80-х гг. прошлого века и нормативно поддерживалась с помощью коэффициента замены, равного 4 %, в соответствии с расчетным сроком службы стальной трубы, равным 25 годам. Такого темпа замены удавалось придерживаться до конца 80-х гг. Однако после 1991 г. коэффициент замены труб отопления и горячего водоснабжения не превысил 2 % [20].

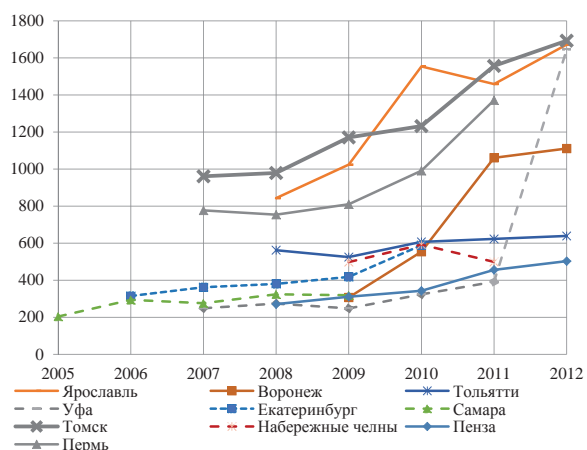


Рис. 2. Изменение количества повреждений на тепловых сетях за период 2005–2012 гг.

Fig. 2. Change in amount of damage of heat networks for 2005–2012

Динамика роста повреждаемости элементов сетей теплоснабжения во временном промежутке с 2005 по 2012 гг. показывает, что за последние годы наблюдается явная тенденция роста повреждаемости сетей (рис. 2).

Рост повреждаемости в г. Уфе с 392 шт. в 2011 г. до 1672 шт. в 2013 г. объясняется следующим: статистика отказов МУП УИС ведется после образования компании с мая 2012 г. Архивов по сетям МУП УИС нет. Преобладающей частью тепловых сетей, находящихся на балансе МУП УИС, являются внутриквартальные тепловые сети, характеризующиеся значительной величиной износа. По данным, предоставленным МУП УИС, за

2012 г. (с 1 мая 2012 г.) количество отказов за отопительный период составило 1053 шт., а количество отказов за часть отопительного периода 2012–2013 гг. (до 31 декабря 2012 г.) – 163 шт.

Увеличение числа повреждений после 2009 г. (рис. 2) связано со «старением» элементов тепловых сетей и недостаточной интенсивностью замены отработанных элементов тепловой сети на новые. Так, в 2008 г. в соответствии с нормативными документами в упомянутых городах заменено в среднем 320 км, или 2 % (от суммарной протяженности ТС), а после 2008 г. объем замены резко снизился до 1–1,5 %.

Проведенные расчеты показали, что количество повреждений элементов тепловых сетей в среднем по городам составляет от 20 до 40 шт. на 100 км трассы и с увеличением срока службы трубопровода возрастает.

В большей мере снижение долговечности вызвано увлажнением из-за плохой работы дренажей. В отдельных случаях дренажи вовсе отсутствуют. Это говорит о низком качестве строительства тепловых сетей.

Гарантией увеличения срока службы трубопроводов тепловых сетей и снижения непроизводительных потерь теплоты может послужить повышение качества работ по электрохимической и антикоррозионной защите, гидрозащите и теплоизоляции [21].

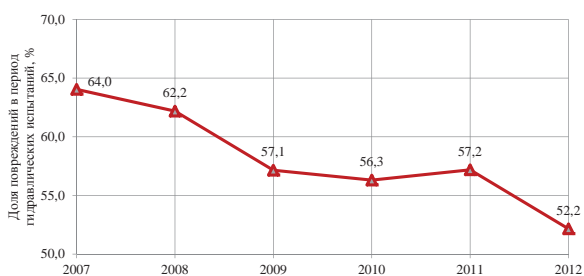
В настоящее время в большинстве городов РФ в качестве основного направления повышения надежности системы теплоснабжения принято считать отбраковку в летний период ослабленных коррозией участков теплосети, которая производится путем гидравлического испытания отдельных участков трубопроводов при повышенном давлении. В шести обследованных городах с целью повышения надежности применяется подключение жилых районов по дублирующей схеме. В некоторых случаях производят отключение горячего водоснабжения.

Основная доля повреждений тепловых сетей, от 50 до 65 % от общего числа повреждений, выявляется в процессе гидравлических испытаний в период подготовки к отопительному сезону.

Заметное снижение доли повреждений, выявленных в период гидравлических испытаний в 2012 г. по сравнению с 2007 г. (рис. 3), противоречащее на первый взгляд данным, представленным на рис. 2, объясняется, по нашему мнению, следующей последовательностью действий персонала:

- недостаток финансирования ведет к недоброкачественному ремонту;
- повреждения возникают в отопительном периоде в тех же местах, где несколькими месяцами ранее уже произведены ремонтно-восстановительные работы;
- учет повреждений теперь осуществляется в отопительном периоде (финансирование за счет аварийно-восстановительного фонда).





**Рис. 3.** Доля повреждений в период проведения гидравлических испытаний от общего количества повреждений (%)

**Fig. 3.** Part of damages during hydraulic tests in total amount of damages (%)

Дефекты элементов систем теплоснабжения

В ходе анализа повреждений отмечаются следующие причины инцидентов:

- дефект запорной арматуры (неисправности вентилей, задвижек, неплотности затворов);
- свищи (локальная наружная коррозия трубы, язвенная наружная коррозия потребительской врезки);
- разрыв трубы (сплошная наружная коррозия);
- внешний коррозионный износ элементов неподвижной опоры.



**Рис. 4.** Количество повреждений по виду оборудования в отопительный и межотопительный периоды (%)

**Fig. 4.** Amount of damages by the type of equipment in heating and non-heating seasons (%)

На рис. 4 представлены усредненные по всей выборке данные по распределению дефектов систем теплоснабжения по причинам их появления. Как и следовало ожидать, наибольшее число инцидентов приходится на повреждения трубопроводов.

Результаты анализа показывают, что доля дефектов арматуры, компенсаторов и прочих причин в системах теплоснабжения городов, представленных в таблице, суммарно составляют 41 % в отопительном периоде и 21 % в межотопительном. Таким образом, наиболее важными остаются дефекты трубопроводов. Они достигают 59 % в ото-

пительный и 79 % в межотопительный периоды от общего количества зарегистрированных инцидентов. Различия объясняются тем, что повреждения выявляются преимущественно в период ремонтов и пусковых испытаний.

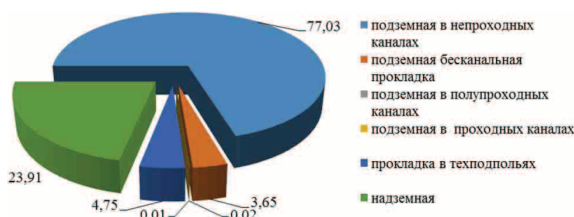
Доля дефектов арматуры и компенсаторов в отопительный период выше, чем в межотопительный. Это связано с проведением гидравлических испытаний на прочность и плотность, что не позволяет выявить в полном объеме дефектное оборудование. Преимущество метода состоит в выявлении «слабых» участков трубопроводов [22, 23].

Дефекты трубопроводов и причины их появления

Прежде чем перейти к анализу дефектов по причинам повреждений, рассмотрим распределение анализируемых сетей по способам прокладки.

Основным типом прокладки трубопроводов являются «подземный в непроходных каналах» с традиционной изоляцией трубопроводов минераловатными матами. На промышленных предприятиях преобладает надземная прокладка тепловых сетей.

Результаты распределения трубопроводов тепловых сетей по способам прокладки представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Распределение протяженности тепловых сетей по способам прокладки (%)

**Fig. 5.** Distribution of heat network extent by the laying method (%)

Подземная прокладка трубопроводов осуществлена в 81 % случаев, причем около 77 % этих сетей выполнены в подземных непроходных каналах и только 4 % приходится на подземные с бесканальной, в полупроходных и проходных каналах. На долю надземной прокладки приходится 24 % всей протяженности тепловых сетей.

Дефекты трубопроводов

Дефекты трубопроводов можно классифицировать в следующие группы:

- внешняя (наружная) коррозия;
- внутренняя коррозия;
- дефект монтажа (разрыв от дефекта сварки);
- заводской дефект;
- прочие (ошибки проекта и т. д.).

Ниже (рис. 6) представлены результаты анализа дефектных ведомостей трубопроводов с распределением тепловых сетей по причинам повреждений.

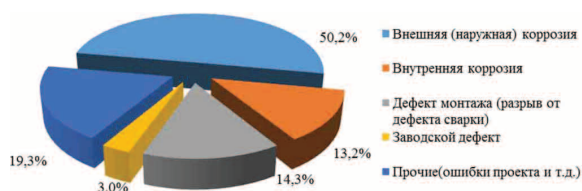


Рис. 6. Распределение дефектов по причинам (%)

Fig. 6. Defect distribution by the reasons (%)

Дефекты трубопроводов по причинам повреждений

Ниже представлены результаты анализа дефектных ведомостей трубопроводов с распределением тепловых сетей по причинам повреждений. Повреждения обнаружены в течение отопительного периода (рис. 7).

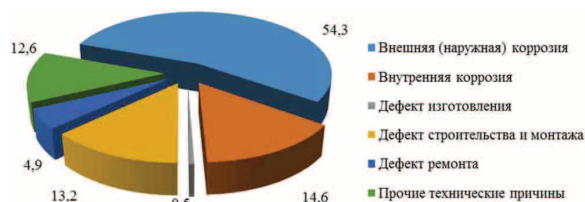


Рис. 7. Распределение дефектов трубопроводов «подземной прокладки в непроходных каналах» по причинам в отопительный период (%)

Fig. 7. Distribution of defects of «subsurface in crawlways» pipelines by the reasons in heating season (%)

Важно помнить, что дефект не появляется мгновенно, он возникает и нарастает в течение определенного времени, в том числе и в межотопительный период. Это дает основание считать, что надежность, ресурс, живучесть и работоспособность трубопровода в первую очередь определяется продолжительностью эксплуатации. Поэтому оценку показателей надежности следует делать с учетом срока наработки трубы.

Наиболее частой причиной повреждений теплопроводов является наружная коррозия. Она наблюдается в 51 % случаев (рис. 8). Количество повреждений, связанных с разрывом продольных и поперечных сварных швов труб, значительно меньше (11 %), чем коррозионных. Основными причинами разрывов сварных швов являются заводские дефекты при изготовлении труб и дефекты сварки труб при строительстве, соответственно 0,4 и 11,9 %.

Одним из важных факторов, влияющих на надежность работы тепловой сети, остается внутренняя коррозия трубопроводов. Она охватывает 26,2 % (рис. 8) случаев. Разрушение металла является одним из проявлений внутренней коррозии, которая приводит не только к снижению надежности транспортировки тепловой энергии, но и ухудшает качество теплоснабжения. Это проявляется в образовании на стенках трубопровода слоя железистых отложений, который увеличивает гидравлическое сопротивление трубопровода, в результате чего для поддержания необходимого гидравлического режима в системе теплоснабжения необходимо повышать давление в подающем трубопроводе. Из-за повышенного давления вероятность появления свищей возрастает, а надежность транспортировки тепловой энергии снижается. Циркулирующие в системе продукты коррозии, попадая в домовые системы, накапливаются в отопительных приборах и уменьшают количество тепла, идущего на обогрев помещений. Жилищные службы для увеличения теплосъема, особенно в периоды низких температур наружного воздуха, начинают сливать сетевую воду из стояков домовых систем [24].

дравлическое сопротивление трубопровода, в результате чего для поддержания необходимого гидравлического режима в системе теплоснабжения необходимо повышать давление в подающем трубопроводе. Из-за повышенного давления вероятность появления свищей возрастает, а надежность транспортировки тепловой энергии снижается. Циркулирующие в системе продукты коррозии, попадая в домовые системы, накапливаются в отопительных приборах и уменьшают количество тепла, идущего на обогрев помещений. Жилищные службы для увеличения теплосъема, особенно в периоды низких температур наружного воздуха, начинают сливать сетевую воду из стояков домовых систем [24].



Рис. 8. Распределение дефектов трубопроводов «подземной прокладки в непроходных каналах» по причинам в межотопительный период и всего за год (%)

Fig. 8. Distribution of defects of «subsurface in crawlways» pipelines by the reasons in non-heating season and per annum (%)

Анализ статистических данных появления повреждений трубопроводов тепловой сети показывает, что повреждения по причине внутренней коррозии выявляются только в 14,6 % в отопительный и 30,4 – в межотопительный периоды (рис. 7, 8). Необходимо при этом отметить, что около 40–45 % инцидентов в тепловых сетях, связанных с трубопроводами, имели явные признаки совместного действия внутренней и наружной коррозии на поверхности металла труб. Поскольку наружная коррозия проявляется более активно, а обнаруживается легче, причиной появления дефекта отмечается только первая из них.

Повреждения, вызванные внутренней коррозией (рис. 9), обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, когда дно коррозионной лунки достигает внешней поверхности трубы или щели в сварочном шве. Протечки через такие повреждения невелики, но их трудно обнаружить, и потому их своевременно не устраняют. Сетевая вода, выходя под давлением из сквозного отверстия, увлажняет и разрушает гидро- и теплоизоляцию. В результате на наружной поверхности трубы создаются благо-



Рис. 9. Внутренняя коррозия трубопроводов тепловых сетей

Fig. 9. Internal corrosion in pipelines of heat networks



Рис. 10. Внешняя коррозия трубопроводов тепловых сетей

Fig. 10. External corrosion in pipelines of heat networks

приятные условия для интенсивного развития наружной коррозии.

В отличие от внутренней коррозии наружная коррозия (рис. 10) реализуется как сплошное утонение металла на большой площади. Когда толщина стенки трубы уменьшается до критической величины, она разрушается, образуя интенсивную протечку теплоносителя. Таким образом, можно сделать вывод, что наличие внутренней коррозии в данном случае является первопричиной возникновения дефекта на трубопроводе.

Например, в одном из анализируемых городов 10 км тепловых сетей подземной прокладки (2,5 % от общей протяженности трубопроводов подземной прокладки в данном городе) на протяжении 3-х месяцев были затоплены грунтовыми и техногенными водами. В таких условиях тепловые сети подземной прокладки при большом количестве подземных кабельных линий связи, силовых кабельных линий напряжением 35 кВ и более подвергались интенсивной электрохимической коррозии. Всего за отопительный период было зафиксировано 22 повреждения на затопленных участках.

Дефекты в зависимости от способа прокладки трубопроводов различаются. Так, при подземной прокладке (рис. 8) основной причиной появления повреждений является наружная коррозия (51 % от общего количества повреждений), а у сетей с надземной прокладкой доля дефектов от внешней и внутренней коррозии распределена соответственно 37 и 25 % (рис. 11).



Рис. 11. Распределение дефектов трубопроводов «надземная прокладка» по причинам в отопительный и межотопительный периоды (%)

Fig. 11. Distribution of defects of «above-ground laying» pipelines by the reasons in heating and non-heating seasons (%)

Увеличение доли повреждений в отопительный период от наружной коррозии (рис. 11) связано с тем, что в отопительный период испытания осуществ-

вляются разрушающими методами. Другими методами диагностика не проводится, а все выявленные дефекты относятся к повреждениям трубопровода (их в основном связывают с наружной коррозией).

В межотопительный период проводятся испытания, по итогам которых можно выявить утонение стенки и классифицировать дефекты по причинам.

Вне зависимости от способа прокладки наблюдается высокий процент дефектов строительства и монтажа (14,3 % – надземная и 11,4 % – подземная прокладка). Это объясняется тем, что за последние годы участились случаи эксплуатации трубы при наличии утечек теплоносителя, особенно в местах соприкосновения труб с металлоконструкциями подвижных и неподвижных опор. Многие опоры на подводящем трубопроводе накрываются и оседают в грунт.

Коррозионные дефекты по трубопроводам

Наружная коррозия, оказывает большее действие на подающие теплопроводы из-за благоприятных для развития коррозии температурно-влажностных условий (рис. 12, 13).

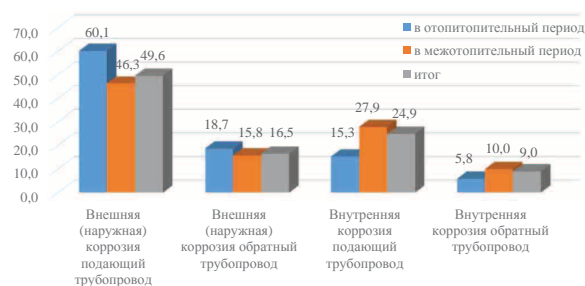


Рис. 12. Распределение коррозии трубопроводов подземной прокладки в отопительный и межотопительный периоды (%)

Fig. 12. Corrosion distribution in subsurface pipelines in heating and non-heating seasons (%)

Суммарная доля повреждений от внешней и внутренней коррозии достигает почти 62 % от всех повреждений (рис. 11). Если сюда же отнести разрывы трубы от дефекта сварки (20,4 %), которые усугубляются коррозией, то общее количество становится подавляющим (82,2 %).

Коррозионные процессы усиливаются на трубах в местах соприкосновения увлажненной изоляции и коррозионно-активных грунтов из-за наличия в них блуждающих токов, отсутствия средств катодной защиты и др.

Проблемными местами сетей с надземной прокладкой являются участки, находящиеся в футляре и зафиксированные хомутами на опорах. В этих случаях повреждения происходят за счет щелевой коррозии там, где постоянно имеет место высокая влажность и доступ кислорода. Электрохимическая коррозия в месте контакта стального футляра с трубопроводом проявляется наиболее отчетливо. Для борьбы с этими видами коррозии применяется только окрашивание надземных трубопроводов [25, 26].

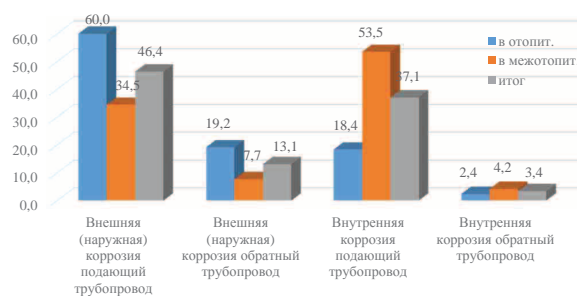


Рис. 13. Распределение коррозии трубопроводов надземной прокладки в отопительный и межотопительный периоды (%)

Fig. 13. Corrosion distribution in above-ground pipelines in heating and non-heating seasons (%)

Наружной коррозии подвержены теплопроводы как бесканальных прокладок, так и проложенные в непроходных и проходных каналах. В соответствии с этим, наличие в системе теплоснабжения сетей надземной прокладки для имеющихся типов изоляции в целом повышает надежность теплоснабжения, так как такие сети не подвергаются затоплению канализационными, сточными и другими водами [27].

Электрохимическая наружная коррозия металла возникает вследствие контакта трубопроводов тепловой сети с грунтом и грунтовыми водами. Ее интенсивность однозначно определяется конструкцией.

Существующие конструкции гидроизоляционного покрытия, подвижных и неподвижных опор, проходы в камеры позволяют соприкоснуться металлу труб с почвенными водами, что приводит к возникновению, при определенных обстоятельствах, электрохимической коррозии и усилению коррозии от блуждающих токов.

Выявлено влияние температуры теплоносителя на наружную коррозию. Регулирование отпуска тепла в большинстве рассматриваемых городов осуществляется качественным путем, то есть за счет изменения температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе в зависимости от температуры наружного воздуха. Влияние температуры сказывается на процессе коррозии металла в зависимости от того, происходит ли процесс коррозии с кислородной или с водородной поляризацией. В почвенных условиях вследствие слабой концентрации растворов кислорода следует ожидать процессов коррозии, происходящих с кислородной поляризацией. При этом скорость наружной коррозии растет с увеличением температуры примерно до 80 °С. Начиная с этой температуры и выше, скорость коррозии снижается вследствие резкого уменьшения концентрации растворенного кислорода в воде [28, 29].

Коррозия металла усиливается, если он подвергается воздействию внутренних и внешних растягивающих усилий или вибрации. В зависимости от температуры и величины показателя рН коррозию от растягивающих напряжений можно ожидать в сварных швах и стыках.

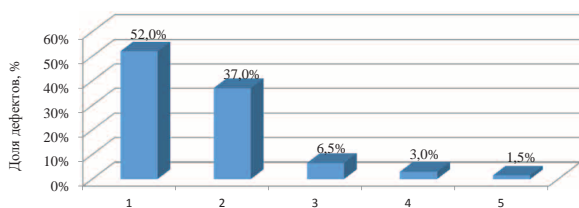
Положение уровня грунтовых вод относительно глубины прокладки труб тепловой сети оказывает существенное влияние на скорость их коррозии. Наиболее неблагоприятным оказывается вариант, когда трубопроводы тепловых сетей проложены на уровне грунтовых вод и периодически (в зависимости от времени года и погодных условий) подвергаются увлажнению.

Основными причинами увлажнения тепловой изоляции для трубопроводов подземной прокладки являются:

- использование малоэффективных и нестойких антикоррозионных покрытий теплопроводов;
- отсутствие или некачественное выполнение гидроизоляции каналов;
- применение гидрофильной теплоизоляции;
- отсутствие попутных дренажей и дренажных насосных станций или их неудовлетворительная работа.

Коррозионные дефекты в тепловых камерах

Анализ статистики дефектов в тепловых камерах (ТК), показал, что на дефекты от наружной коррозии труб приходится 80–85 %. Они распределены так, как это показано на рис. 14. На повреждения, относящиеся к неподвижным опорам, приходится 52 % от числа повреждений в ТК.



**Рис. 14.** Распределение коррозионных дефектов в ТК: 1 – повреждения у стенки камеры и в неподвижных опорах; 2 – повреждения трубных переходов и перемычек; 3 – повреждения спускников; 4 – повреждения воздушников; 5 – повреждения гильз термометров и штуцеров манометров

**Fig. 14.** Distribution of corrosive defects in heat chambers: 1 are the damages near the chamber wall and in fixed stands; 2 are the damages of pipe reducers and seals; 3 are the damages of drain valves; 4 are the damages of air grooves; 5 are the damages of thermometer tubes and pressure adapter groups

Около 32 % повреждений приходится на неподвижные опоры. Их коррозия вызвана следующими причинами:

- воздействие блуждающих токов в щитовых опорах из-за отсутствия надежных электроизоляционных вставок;
- возникновение капли с перекрытий из-за конденсации влаги приводит к усиленной коррозии наружной поверхности труб;
- приварка косынок создает предпосылки для интенсификации процессов внутренней коррозии трубы в местах расположения сварных швов и околошовной зоны;
- одновременное воздействие переменных циклических напряжений и коррозионной среды

вызывают понижение коррозионной стойкости и предела выносливости металла.

## Выводы

1. На основании проведенного анализа дефектных ведомостей и ремонтной документации тепловых сетей городов Российской Федерации можно сделать вывод, что, несмотря на существенные различия климатических, географических, демографических и других условий, характерных для обследованных городов, показатели повреждаемости тепловых сетей в них практически одинаковы. Надежность работы ТС напрямую зависит от конструкции, длины, сроков службы, качества эксплуатации и т. д. Общие для всех городов правила технического обслуживания и ремонтов, одинаковость финансово-экономического положения предприятий ТС привели состояние сетей к одинаковым технологическим условиям.
2. Формирование статистической базы данных о повреждениях, содержащихся не только в отчетных материалах, но и в ремонтной документации (заявочные и дефектные ведомости) позволяет существенно уточнить объемы и характер повреждений в ТС и наметить исчерпывающие меры по их преодолению.
3. Основными факторами, влияющими на снижение надежности узлов теплоснабжения, являются:
  - а) материал применяемых труб и арматуры;
  - б) способ прокладки и конструкция тепловых сетей;
  - в) коррозионная активность грунта и грунтовых вод;
  - г) теплоизоляция;
  - д) гидроизоляция и защитные покрытия;
  - е) воздействие механических усилий;
  - ж) уровень эксплуатации трубопроводов;
  - з) воздействие блуждающих токов;
  - и) температура теплоносителя;
  - к) уровень резервирования.

Наиболее существенными среди них являются: наружная и внутренняя коррозия, длительная эксплуатация и случайные причины.

Причем, стоит отметить, что интенсивность процесса электрохимической наружной коррозии металла связана с первыми пятью предпосылками (а–д).

Причины, рассмотренные выше, способны привести к систематическому появлению различного рода дефектов элементов систем теплоснабжения.

4. Как отмечалось выше, наиболее частым видом повреждений в ТС является внешняя и внутренняя коррозия трубопроводов. Именно это должно стать основанием для разработки и реализации эффективных мер по ее снижению. Среди этих мер нельзя не упомянуть:

- предотвращение увлажнения изоляции;
- антикоррозионные покрытия труб и арматуры;
- совершенствование способов прокладки;
- организацию катодной защиты трубопроводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зингер Н.М., Малафеев В.А. Технические проблемы развития теплофикации и централизованного теплоснабжения в работах ВТИ // Электрические станции. – 1996. – № 7. – С. 23–28.
2. Дильман М.Д. Методы и модели обоснования надежности систем теплоснабжения и источников теплоты: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 188 с.
3. Макаров А.А., Митрова Т.А., Кулагин В.А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и России // Экономический журнал ВШЭ. – 2012. – № 2. – С. 172–204.
4. ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 36 с.
5. СНиП 41–02–2003 «Тепловые сети». – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. – 52 с.
6. Надежность систем энергетики. Терминология / под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Наука, 1980. – Вып. 95. – 42 с.
7. Надежность систем энергетики (Сборник рекомендуемых терминов) / отв. ред. Н.И. Воропай. – М.: ИАЦ «Энергия», 2007. – 192 с.
8. Мониторинг надежности тепловых сетей / В.Н. Мелькумов, С.Н. Кузнецов, К.А. Скляров, А.А. Горских // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1 (17). – С. 52–58.
9. Требования к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения (утверждены постановлением Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. № 154). – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 2012 г. – № 10 – 21 с.
10. Методические рекомендации по разработке схем теплоснабжения (утверждены совместным приказом Минэнерго РФ и Минрегионразвития РФ от 29.12.2012 г. № 565/667). URL: [http://www.rostplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=1557](http://www.rostplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1557) (дата обращения: 01.11.2014).
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. 7-е изд., стереот. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 472 с.
12. Островский К.А. Классификация и тестирование производительности способов хранения таблиц в задачах обработки экспериментальных данных // Молодой ученый. – 2011. – № 6. – Т. 1. – С. 120–129.
13. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
14. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.
15. Garpeev P.V., Shiryaev A.N. Bayesian quickest detection problems for some diffusion processes // Advances in Applied Probability. – 2013. – V. 45:1. – P. 164–185.
16. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. – 551 с.
17. Горелова Г.В., Кацко И.А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel. 3-е изд., доп. и перераб. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.
18. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов «Statistica» и «Excel». – М.: Форум, 2004. – 464 с.
19. Клименко А.В., Гашо Е.Г. Проблемы повышения эффективности коммунальной энергетики на примере объектов ЖКХ ЦАО г. Москвы // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 54–59.
20. Российский статистический ежегодник за периоды с 2000 по 2013 гг. – М.: Росстат, 2014. – 693 с.
21. Приказ от 13 декабря 2000 г. № 285 об утверждении типовой инструкции по технической эксплуатации тепловых сетей систем коммунального теплоснабжения. – М., 2001. – 36 с.
22. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Б. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
23. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair / L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R.B. Polder. – Weinheim: Wiley-VCH, 2013. – 340 p.
24. Суриц М.А., Липовских В.М. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 216 с.
25. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. P. I: Quantitative model-based methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. Kavuri, K. Yin // Computers and Chemical Engineering. – 2003. – V. 27. – P. 293–311.
26. Detroja K.P., Gudi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis // Control Engineering Practice. – 2007. – V. 15. – Iss 12. – P. 1468–1483.
27. СО 153–34.17.464–2003 / Инструкции по продлению срока службы трубопроводов II, III, IV категорий. – М.: ЦПТИ ОР-ГРЭС, 2004. – 146 с.
28. ПБ 10–573–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. – М: НТЦ «Промышленная безопасность», 2008. – 60 с.
29. Чистович С.А. 100-летняя история и будущее теплофикации и централизованного теплоснабжения России // 100 лет теплофикации и централизованному теплоснабжению в России: сб. статей. – М.: Новости теплоснабжения, 2003. – С. 198–208.

*Поступила 04.11.2014 г.*

UDC 697.34

## DAMAGEABILITY OF THE MAIN KNOTS OF HEAT SUPPLY NETWORKS IN THE CITIES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Ivan L. Moskalev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: moskalew@tpu.ru

Valery V. Litvak,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: litvak@tpu.ru

*Improving the repair service system is becoming more and more important task in various industries. Damage from undersupply of heat energy to consumers is greatly reduced when decreasing time from the moment of damage occurrence in the centralized heat supply systems to detection and correction of this corruption. Thus, to reduce prejudice and for successful solution of problems of resource saving the time limit for the recovery period is of considerable importance. This is the urgency of the task. The work in the field of resource saving deployed in the Russian Federation in the past years makes the task of nationwide scale.*

**The main aim** of the study is to analyze the repair and maintenance documentation elements of the district heating of the large cities in the Russia Federation; to classify defects, to create and to process database of defectiveness.

**The methods used in the study.** The authors have used the advanced statistical treatment of results and experimental studies; methods of probability theory and mathematical statistics. When developing the databases of damage and work with them the software packages Microsoft Access database and Excel, Autodesk AutoCAD, Statistica were used.

**The results.** Based on the data collected by the heating system of the 21 cities in the Russian Federation the authors carried out a comprehensive analysis of damage: according to the terms of exploitation; on the elements of the heat supply system; for reasons of appearance, the elements and depending on the laying method. The «weak» points were identified and the causes of elements damage in the district heating systems were established.

### Key words:

Thermal network, thermal camera, incident, defect, corrosion.

### REFERENCES

- Zinger N.M., Malafeev V.A. *Tekhnicheskie problemy razvitiya teplofikatsii i tsentralizovannogo teplosnabzheniya v rabotakh VTI* [Engineering problems of developing central heating in VTI works]. *Elektricheskie stantsii*, 1996, no. 7, pp. 23–28.
- Dilman M.D. *Metody i modeli obosnovaniya nadezhnosti sistem teplosnabzheniya i istochnikov teploty. Dis. Kand. nauk* [Methods and models of justification of reliability of heat supply systems and heat sources. Cand. Diss.]. Moscow, 2000. 188 p.
- Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A. *Dolgosrochny prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii* [Long-term prediction of power engineering development in the world and in Russia]. *Ekonomicheskii zhurnal VSHE*, 2012, no. 2, pp. 172–204.
- GOST 27.002–89 «Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya»* [State Standard 27.002–89. Reliability in engineering. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989. 36 p.
- SNiP 41–02–2003 «Teplovye seti»* [SNiP 41–02–2003. Thermal networks]. Moscow, Gosstroy Rossii, FGUP TSPP, 2004. 52 p.
- Nadezhnost sistem energetiki. Terminologiya* [Reliability of power engineering systems. Terms]. Ed. by Yu.N. Rudenko. Moscow, Nauka Publ., 1980. Iss. 95, 42 p.
- Nadezhnost sistem energetiki (Sbornik rekomenduemykh terminov)* [Reliability of power engineering systems. Reference book of the main terms]. Ed. by N.I. Voropay. Moscow, Energiya Publ., 2007. 192 p.
- Melkumov V.N., Kuznetsov S.N., Sklyarov K.A., Gorskikh A.A. *Monitoring nadezhnosti teplovykh setey* [Monitoring thermal network reliability]. *Nauchyy vestnik VGASU. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2010, no. 1 (17), pp. 52–58.
- Trebovaniya k skhemam teplosnabzheniya, poryadku ikh razrabotki i utverzheniya (utverzhdeny postanovleniem Pravitelstva RF ot 22 fevralya 2012, no. 154)* [Requirements to heat supply schemes, the order of their development and approval (approved by the decree of the RF government, 22 February 2012, no. 154)]. Moscow, Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii, 2012, no. 10, 21 p.
- Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke skhem teplosnabzheniya (utverzhdeny sovmestnym prikazom Minenergo RF i Minregionrazvitiya RF ot 29.12.2012 g. no 565/667)* [Guidelines in development of heat supply schemes (approved by the joint decree of the RF Ministry of Energy and, 29 December 2012, no. 565/667)]. Available at: [http://www.rosteplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=1557](http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1557) (accessed 01 November 2014).
- Sokolov E.A. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [Direct heat supply and heating network]. Moscow, MEI Press, 2011. 472 p.
- Ostrovskiy K.A. *Klassifikatsiya i testirovanie proizvoditelnosti sposobov khraneniya tablits v zadachakh obrabotki eksperimentalnykh dannykh* [Classification and testing of the performance of the methods for table storage in the experimental data processing tasks]. *Molodoy ucheny*, 2011, no. 6, vol. 1, pp. 120–129.
- Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostey* [Applied statistics. Study of dependence]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1985. 488 p.
- Pugachev V.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 496 p.
- Gapeev P.V., Shiryaev A.N. Bayesian quickest detection problems for some diffusion processes. *Advances in Applied Probability*, 2013, vol. 45:1, pp. 164–185.
- Kremer N.Sh. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, YUNITI-DANA Publ., 2010. 551 p.
- Gorelova G.V. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika v primerakh i zadachakh s primeneniem Excel* [Probability theory and mathematical statistics in examples and tasks applying Excel]. Rostov n/D, Feniks Publ., 2005. 480 p.

18. Vukolov E.A. *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsii s ispolzovaniem paketov «Statistica» i «Excel»* [Fundamentals of statistical analysis. Laboratory course in statistical methods and research of operations using «Statistica» and «Excel»]. Moscow, Forum Publ., 2004. 464 p.
19. Klimenko A.V., Gasho E.G. Problemy povsheniya effektivnosti kommunalnoy energetiki na primere obektov ZhKKh TsAO g. Moskvy [Increase of commulative power effectiveness by the example of the objects of ZhKKh TsAO in Moscow]. *Teploenergetika*, 2004, no. 6, pp. 54–59.
20. *Rossiiskiy statisticheskiy ezhegodnik za periody s 2000 po 2013 gg.* [Russian statistical yearbook for 2000–2013]. Moscow, Rosstat Publ., 2014. 693 p.
21. *Prikaz ot 13 dekabrya 2000 g. № 285 ob utverzhdenii tipovoy instruktsii po tekhnicheskoy ekspluatatsii teplovykh setey sistem kommunalnogo teplosnabzheniya* [Order of 13 December 2000, no. 285 on approval of standard instruction for technical maintenance of thermal networks in the systems of municipal heat supply]. Moscow, 2001. 36 p.
22. Freyman L.I., Makarov V.A., Bryskin I.B. *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoy zashchite* [Potentiostatic methods in corrosive investigations and electrochemical protection]. Moscow, Khimiya Publ., 1972. 240 p.
23. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Weinheim, Wiley-VCH, 2013. 340 p.
24. Suris M.A., Lipovskikh V.M. *Zashchita truboprovodov teplovykh setey ot naruzhnoy korrozii* [Protection of heat network pipelines from external corrosion]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 216 p.
25. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Kavuri S., Yin K. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, vol. 27, pp. 293–311.
26. Detroja K.P., Gudi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis. *Control Engineering Practice*, December 2007, vol. 15, Iss. 12, pp. 1468–1483.
27. *SO 153–34.17.464–2003. Instruktsii po prodleniyu sroka sluzhby truboprovodov II, III, IV kategoriy* [SO 153–34.17.464–2003. Instructions on life extension of pipelines of the II, III, IV categories]. Moscow, TsPTI ORGRES Publ., 2004. 146 p.
28. *PB 10–573–03. Pravila ustroystva i besopasnoy ekspluatatsii truboprovodov para i goryachey vody* [PB 10–573–03. Rules for design and safe operation of steam and hot water lines]. Moscow, NTTs «Promyshlennaya besopasnost» Publ., 2008. 60 p.
29. Chistovich S.A. 100-letnyaya istoriya i budushchee teplofikatsii i tsentralizovannogo teplosnabzheniya v Rossii [100 years history and the future of direct heating and central heating in Russia]. *100 let teplofikatsii i tsentralizovannomu teplosnabzheniyu v Rossii. Sbornik statey* [100 anniversary of direct heating and central heating in Russia. Collection of articles]. Moscow, Novosti teplosnabzheniya Publ., 2003. pp. 198–208.

Received: 04 November 2014.



УДК 621.791.927.2

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ СТАЛИ 10P6M5 НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЯ. НАПЛАВКА ОДИНОЧНОГО ВАЛИКА (Ч. I)

**Хайдарова Анна Александровна,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: haydarova@tpu.ru

**Гнюсов Сергей Федорович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: gnusov@rambler.ru

Определяющим параметром при плазменной наплавке является тепловложение, которое можно регулировать силой сварочного тока и скоростью перемещения источника нагрева. Увеличение тепловложения в значительной степени может оказывать влияние на формирование структуры и свойств наплавляемого материала. В связи с этим выбор параметров режима плазменной порошковой наплавки при восстановлении или упрочнении поверхности детали, например торцевых уплотнений, используемых для насосов нефтедобычи, нефтепереработки, является актуальной задачей. Однопроходную плазменную наплавку промышленным порошком стали 10P6M5 с гранулометрическим составом 100...350 мкм производили на пластины из стали 20 размером 400×150×10 мм. В качестве транспортирующего, защитного и плазмообразующего газа использовался аргон. Наплавку производили на установке УПН-30ЗУХЛ4. В работе использовали плазмотрон с внутренней схемой ввода порошка в дугу. Для изменения погонной энергии использовали режимы с различными значениями силы тока и скорости наплавки. Проведен анализ влияния погонной энергии при плазменной порошковой наплавке одиночного валика на формирование его структурно-фазового состава и твердости. Анализ микроструктур проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX 51 с комплектом прикладных программ SIAMS 700, сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения JSM-7500FA, снабженного системой энергодисперсионного микроанализа производства JEOL, рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S в фильтрованном  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Показано, что с ростом величины погонной энергии плазменной порошковой наплавки от 20 до 42 кДж/см увеличивается ширина наплавляемого валика в два раза и глубина проплавления основного металла от 0,2 до 0,9 мм. Установлено, что при увеличении тепловложения в процессе наплавки происходит снижение доли эвтектики в объеме наплавленного металла в 2 раза, увеличение количества мартенсита в объеме матрицы с 72 до 84 % и среднего размера частиц карбидов ванадия с 0,75 до 2 мкм. При малом тепловложении вблизи границы сплавления и в верхней части наплавленного валика формируется слой материала толщиной ~100...150 мкм, в котором фиксируется увеличение количества дисперсных карбидов до ~4 %, а эвтектическая сетка карбидов отсутствует. При увеличении погонной энергии до 25 кДж/см средняя величина микротвердости сохраняется на уровне 860 HV, с ростом тепловложения до 30 кДж/см она падает до 780...790 HV и далее остается неизменной при дальнейшем росте тепловложения.

### Ключевые слова:

Плазменная порошковая наплавка, наплавка порошком стали 10P6M5, микроструктура, эвтектика, карбиды типа  $\text{M}_6\text{C}$  и  $\text{VC}$ , твердость.

### Введение

В настоящее время активно проводятся исследования по модификации [1–5] приповерхностного объема сталей и сплавов концентрированными потоками энергии: сварка (в том числе и разнородных материалов) [6–8], термическая обработка [9] и упрочнение рабочих поверхностей наплавкой композиционными порошками [10, 11]. Наиболее широко для наплавки и легирования используется электронный луч в вакууме [12–15] и выведенный в атмосферу [16], плазменная порошковая наплавка (ППН) [17]. Из наплавочных материалов широкое распространение получили промышленные порошки 10P6M5, ПХ-18ФНМ, ПГС-17 либо специально подготовленные смеси на основе аустенитной или аустенитно-мартенситной матрицы,

дополнительно легированные карбидами вольфрама, титана, ванадия или хрома [18].

В ряде технологических процессов восстановления или изначального формирования покрытий эффективнее использовать плазменную порошковую наплавку из-за высокой концентрации тепловой мощности, малого перемешивания наплавляемого материала с основой, сложной геометрии наплавляемой детали. Однако при ППН по сравнению с вакуумной электронно-лучевой наплавкой объем ванны расплава увеличивается в 5...25 раз (размер ванны расплава для вакуумной электронно-лучевой наплавки изменяется в интервале ~20...100 мм<sup>3</sup>, вневакуумной – ~2500...4000 мм<sup>3</sup> и ППН – ~100...2500 мм<sup>3</sup>), что будет существенно влиять на изменение структурно-фазового состава покрытия.

Определяющим параметром при плазменной наплавке является тепловложение, на которое влияет сила сварочного тока и скорость перемещения источника нагрева [10]. Увеличение погонной энергии наплавки в значительной степени может оказывать влияние на формирование структуры и свойств наплавляемого материала как за счет роста доли участия основного металла, так и за счет перегрева ванны расплава. В связи с этим выбор параметров режима плазменной порошковой наплавки при восстановлении или упрочнении поверхности детали является актуальной задачей.

Целью работы является исследование влияния погонной энергии при плазменной порошковой наплавке одиночного валика порошком стали 10P6M5 на формирование его структурно-фазового состава и твердости.

#### Материал, оборудование и методы исследования

В работе производили однопроходную плазменную наплавку промышленным порошком стали 10P6M5 с гранулометрическим составом 100...350 мкм на пластины из стали 20 размером 400×150×10 мм. Постоянным параметром режима наплавки был расход: транспортирующего и защитного газа (10...16 л/мин), плазмообразующего газа (2 л/мин), а также порошка (1,9 кг/ч). Наплавку производили на установке УПН-30ЗУХЛ4. В работе использовали плазмотрон с внутренней схемой ввода порошка в дугу.

Для изменения погонной энергии использовали режимы с различными значениями силы тока и скорости наплавки. Эффективную погонную энергию рассчитывали согласно ГОСТ Р ИСО 857-1-2009 «Сварка и родственные процессы. Словарь». Эффективный КПД нагрева изделия дугой принимали равным 0,55...0,63. Напряжение на дуге составляло 35...45 В. В таблице представлены параметры режимов наплавки, где  $I$  – сила тока,  $V_{\text{нап}}$  – скорость наплавки,  $q_n$  – погонная энергия наплавки.

Измерение геометрических размеров наплавленных валиков производили в пяти произвольных точках на участке установившегося режима наплавки. Структурно-фазовый анализ наплавленных покрытий производили в поперечном и продольном сечениях (рис. 1). Поперечное сечение

выполняли в центральной части наплавки, продольное сечение выполняли на расстоянии 1/3 высоты наплавленного слоя от наплавляемой поверхности.

**Таблица.** Режимы плазменно-порошковой наплавки  
**Table.** Modes of plasma-powder surfacing

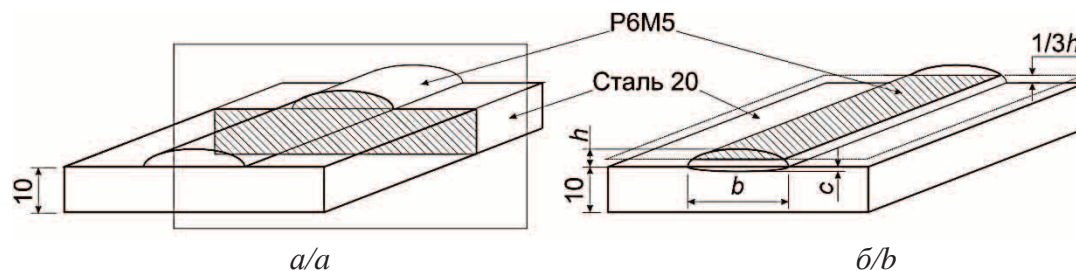
Режим наплавки Surfacing mode	$I$ , А	$V_{\text{нап}}$ , см/с (cm/s)	$q_n$ , кДж/см (kJ/cm)
1	160	0,17	20
2	220	0,21	25
3	160	0,13	30
4	200	0,17	32
5	220	0,17	37
6	220	0,13	42

Структуру наплавленных покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX 51 с комплектом прикладных программ SI-AMS 700. Химическое травление микрошлифов проводили методом окупания предварительно отполированной поверхности в 4 % спиртовой раствор  $\text{HNO}_3$  с выдержкой в течение 20...60 секунд. Растровую электронную микроскопию наплавленных покрытий проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения JSM-7500FA, снабженного системой энергодисперсионного микроанализа производства JEOL, позволяющего проводить элементный анализ. Фазовый состав покрытий исследовали с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S в фильтрованном  $\text{CuK}\alpha$ -излучении в интервале углов  $2\Theta$  15...150° с шагом 0,05°. Для количественного фазового анализа использовали значения интегральной интенсивности дифракционных линий.

Микротвердость покрытий в поперечном и продольном сечениях измеряли на приборе HVS-1000 с шагом по глубине 150 мкм при нагрузке 5 Н.

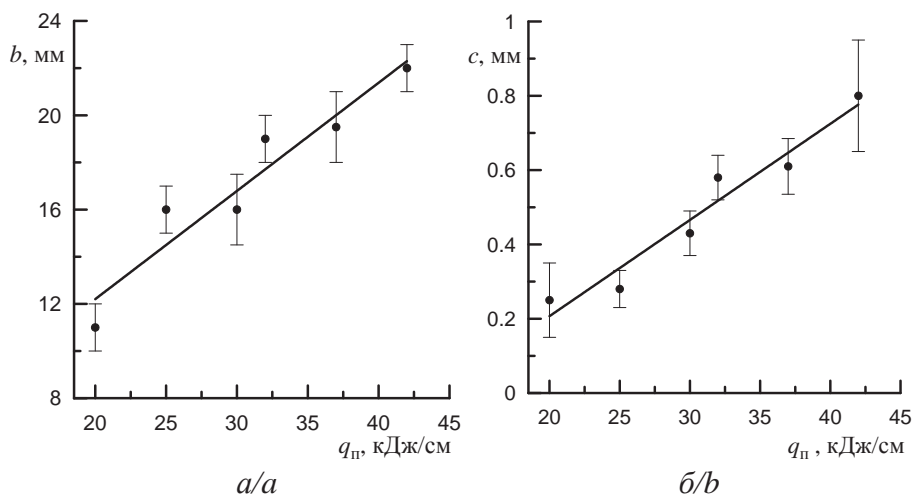
#### Результаты и обсуждения

На рис. 2 представлены изменения ширины валиков ( $b$ ) и глубины проплавления © основного металла в зависимости от величины погонной энергии при ППН. При неизменном объеме присадочного материала, поступающего в ванну расплава, с



**Рис. 1.** Поперечное (а) и продольное (б) сечения наплавленных образцов, в которых производился структурно-фазовый анализ упрочненных слоев

**Fig. 1.** Cross-section (a) and longitudinal section (b) of the samples deposited where the structural-phase analysis of hardened layers was carried out



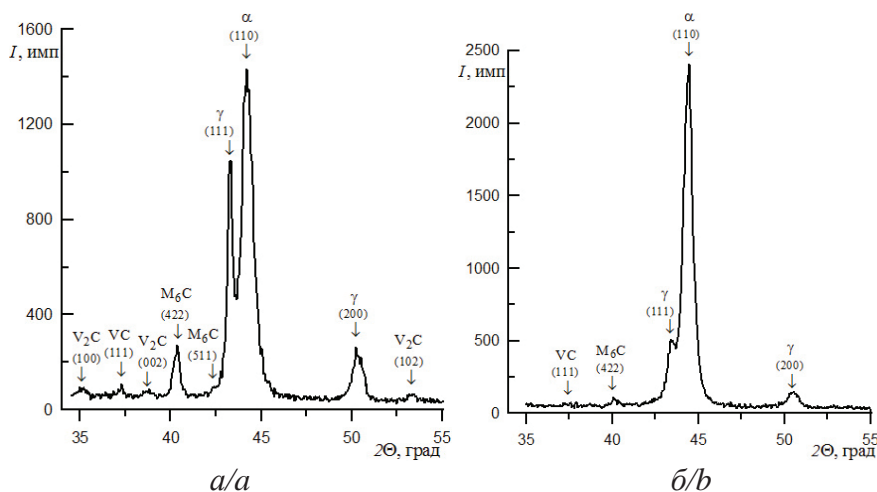
**Рис. 2.** Изменения  $b$  – ширины наплавляемых валиков (а) и  $c$  – глубины проплавления (б) основного металла при увеличении погонной энергии плазменной наплавки

**Fig. 2.** Changes in  $b$  – the width of the rollers deposited (a) and  $c$  – the depth of penetration (b) of the main metal when decreasing heat input of plasma surfacing

ростом величины погонной энергии наплавки повышается усваиваемость порошка и улучшается смачиваемость наплавляемой поверхности. Все это приводит к увеличению ширины наплавляемого валика практически в два раза (рис. 2, а) и к росту глубины проплавления основного металла от 0,2 до 0,9 мм (рис. 2, б).

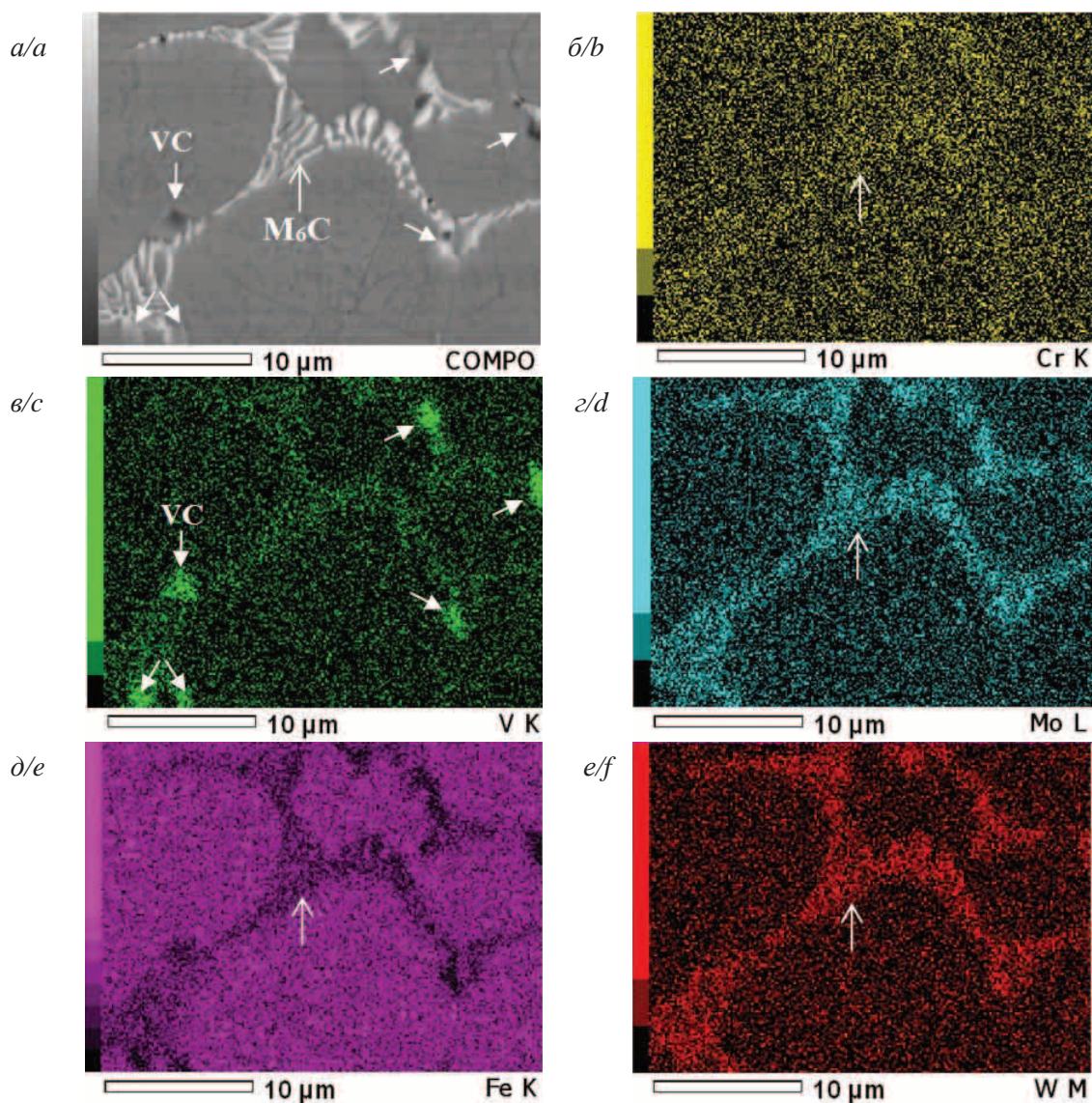
Увеличение доли участия основного металла в наплавленном слое сказывается на формировании его структуры. На основе данных РСА (рис. 3) и оптической металлографии (рис. 4, а) структурно-фазовый состав наплавленного металла представляет собой аустенитно-мартенситную матрицу с сеткой эвтектических карбидов типа  $M_6C$  «скелетно-реберной» морфологии. С увеличением погонной энергии наплавки с 20 до 42 кДж/см объе-

мая доля  $\alpha$ -фазы увеличивается с 72 до 84 % (рис. 3), что связано с ростом участия основного металла (величины проплавления, рис. 2, б) в наплавленном и, следовательно, уменьшением легированности матрицы. Это способствует росту температуры начала мартенситного превращения [19]. Одновременно с ростом количества мартенсита в общем объеме матрицы увеличивается и размер его игл (пластин). При малой погонной энергии наплавки (до 30 кДж/см) формируется бесструктурный (или дисперсный) мартенсит, травимостью которого в растворе азотной кислоты понижена (рис. 5, б). Наплавка с большей погонной энергией приводит к увеличению размеров игл мартенсита и, следовательно, лучшей его травимости (рис. 6, в).



**Рис. 3.** Участок рентгенограмм покрытий, наплавленных при величине погонной энергии 20 (а) и 42 кДж/см (б)

**Fig. 3.** Section of X-ray patterns of coatings deposited at heat input value of 20 (a) and 42 kJ/cm (b)



**Рис. 4.** Микроструктура наплавленного металла (а) при погонной энергии 42 кДж/см и энергодисперсионный элементный анализ в лучах Cr (б), V (в), Mo (г), Fe (д) и W (е)

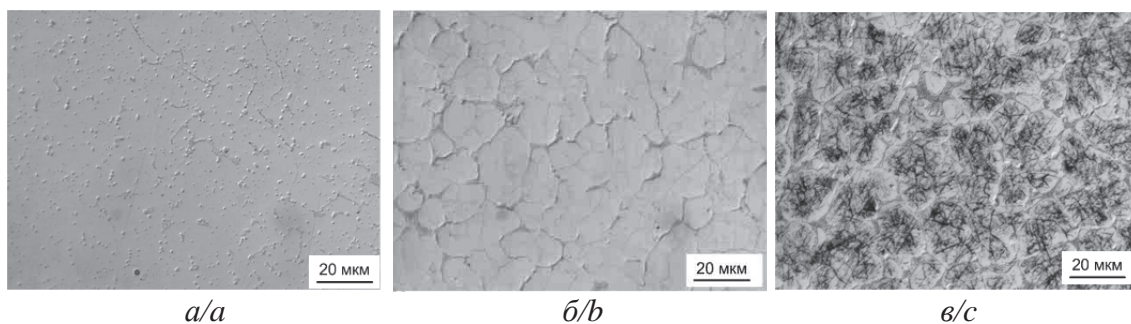
**Fig. 4.** Microstructure of the deposited metal (a) at heat input of 42 kJ/cm and energy-dispersive elemental analysis in beams of Cr (b), V (c), Mo (d), Fe (e) and W (f)

Упрочняющая фаза в покрытиях представлена первичными и вторичными карбидами типа  $M_6C$ . Первичные эвтектические карбиды располагаются вдоль границ зерен, дисперсные вторичные карбиды равноосной формы в основном расположены в теле зерен матрицы. Объемная доля эвтектики и, следовательно, эвтектических карбидов в ней с ростом величины погонной энергии уменьшается (рис. 6, а), а среднее расстояние между ними (прослоек матрицы) увеличивается (рис. 6, б). Данные изменения характерны для обоих исследуемых сечений.

Анализ результатов микрорентгеноспектрального анализа свидетельствует о том, что в состав карбида  $M_6C$  входят W, Mo, Cr, V и Fe (рис. 4, б–е). Количество каждого из этих элементов детально

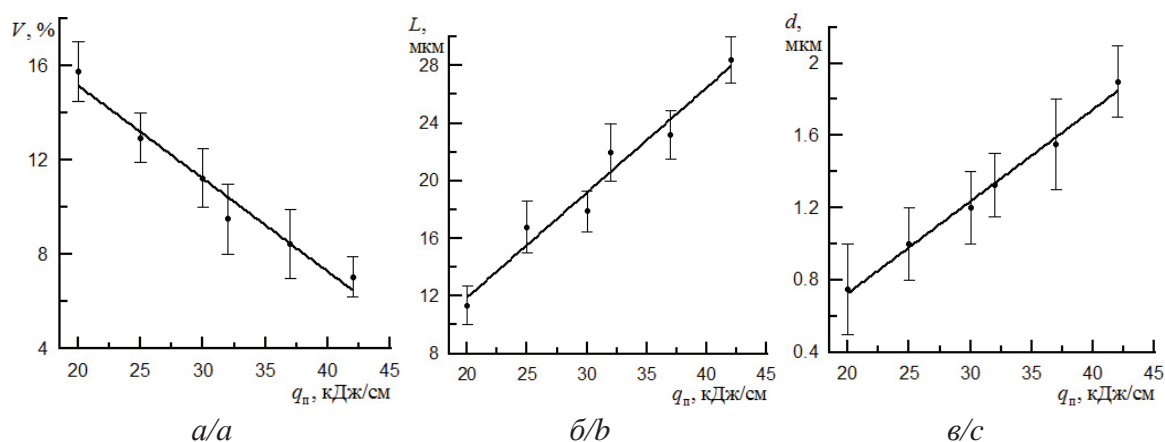
изучено в [20–22], где с помощью просвечивающей электронной микроскопии установлено, что химический состав эвтектического карбида содержит (%): W – 44,6; V – 27; Mo – 18,3; Cr – 2,8; Fe – 2,3 и C – 5. В составе вторичных карбидов  $M_6C$  по сравнению с эвтектическими существенно (в 4 раза) уменьшена доля ванадия.

Вблизи эвтектических карбидов во всем объеме наплавленного металла наблюдаются дисперсные выделения частиц карбида ванадия сферической и угловатой форм (рис. 4, а, в). Согласно данным РСА карбид ванадия имеет химическую формулу VC и  $V_2C$  (рис. 3, а). Средний размер данных частиц с ростом погонной энергии наплавки увеличивается от 0,75 до 2 мкм (рис. 6, в), а их объемная доля сохраняется на уровне ~1,1...2,3 %. Макси-



**Рис. 5.** Микроструктура металла, наплавленного при  $q_n=20$  (а, б) и 35 кДж/см (в): а – у границы сплавления с основным металлом; б – на расстоянии 200 мкм от границы сплавления

**Fig. 5.** Microstructure of metal deposited at  $q_n=20$  (a, b) and 35 kJ/cm (c): a – near welding boundary with base metal; b – 200  $\mu\text{m}$  from welding boundary



**Рис. 6.** Изменение объемной доли эвтектики (а), размера прослоек матрицы (б) и частиц карбидов ванадия (в) с ростом величины погонной энергии наплавки

**Fig. 6.** Change of eutectic volume ratio (a), matrix gap size (b) and particles of vanadium carbide (c) at increase of surfacing heat input value

мальное количество частиц VC наблюдается в металле, наплавленном при величине погонной энергии 30...32 кДж/см, при этом выделение дисперсных частиц по всему объему упрочненного слоя равномерно, а их средний размер составляет 1,2 мкм. Увеличение тепловложения свыше 35 кДж/см не приводит к изменению объемной доли VC в наплавленном металле, однако способствует росту их среднего размера до 2 мкм. Таким образом, можно отметить, что с увеличением энтальпии порошка стали Р6М5 при наплавке происходит укрупнение карбидов ванадия более чем в два раза (рис. 6, в).

При наплавке с меньшим тепловложением (20...25 кДж/см) вблизи границы сплавления и в верхней части наплавленного валика формируется слой материала толщиной ~100...150 мкм, в котором фиксируется увеличение количества дисперсных карбидов до ~4 %, а эвтектическая сетка карбидов отсутствует. Наблюдаются только отдельные, преимущественно тонкие, вытянутые эвтектические включения (рис. 5, а). Вне этих слоев формируется сетка эвтектических карбидов по границам зерен (рис. 5, б) со структурой аналогичной образующейся при большей погонной энергии

(рис. 5, в). При этом объемная доля эвтектики в металле, наплавленном на режимах с низким тепловложением, наибольшая и составляет ~16 % (рис. 6, а). Формирование такого слоя как вблизи границы сплавления, так и в верхней части валика можно связать с более быстрым его охлаждением по сравнению с основным объемом наплавленного металла.

Структурно-фазовые изменения металла, наплавленного при различном тепловложении, определяют уровень твердости упрочненного слоя. Наибольшее количество первичных карбидов типа  $M_6C$ , а также дисперсность мартенсита, формирующаяся при малой величине тепловложения (20 и 25 кДж/см) обеспечивают максимальный уровень микротвердости покрытиям (860 HV, рис. 7). Однако за счет неоднородной структуры покрытий по высоте валика (образования слоев материала вблизи границы сплавления и в верхней части наплаваемого валика) наблюдается значительный разброс значений микротвердости от ее средней величины. При увеличении погонной энергии до 30...42 кДж/см средняя величина микротвердости уменьшается до 780...790 HV и не зависит от тепловложения (рис. 7).

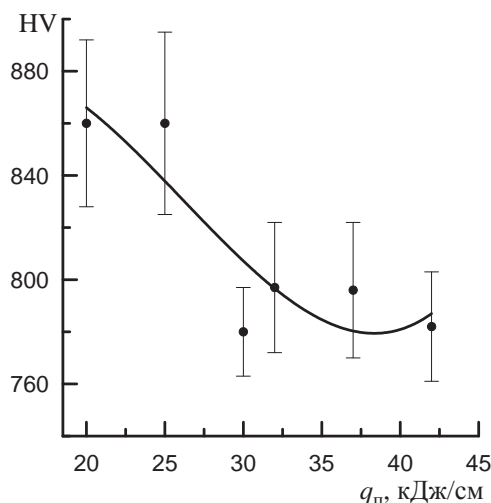


Рис. 7. Изменение микротвердости покрытий от тепловложения при ППН

Fig. 7. Change of coating microhardness on heat input at plasma-powder surfacing

#### Выводы

1. Установлено, что с ростом величины погонной энергии ППН от 20 до 42 кДж/см увеличивается ширина наплавляемого валика в два раза и

глубина проплавления основного металла от 0,2 до 0,9 мм.

2. При увеличении тепловложения в процессе наплавки порошка стали 10P6M5 происходит снижение доли эвтектики в объеме наплавленного металла в 2 раза, увеличение количества мартенсита в объеме матрицы с 72 до 84 % и среднего размера частиц карбидов ванадия с 0,75 до 2 мкм. Одновременно с ростом количества мартенсита увеличивается размер мартенситных пластин.
3. Показано, что при малом тепловложении вблизи границы сплавления и в верхней части наплавленного валика формируется слой материала толщиной ~100...150 мкм в котором фиксируется увеличение количества дисперсных карбидов до ~4 %, а эвтектическая сетка карбидов отсутствует.
4. При увеличении погонной энергии до 25 кДж/см средняя величина микротвердости сохраняется на уровне 860 HV, с ростом тепловложения до 30 кДж/см она падает до 780...790 HV и далее остается неизменной при дальнейшем росте тепловложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ ТПУ № 862.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microstructure of the near-surface layers of austenitic stainless steels irradiated with a low-energy, high-current electron beam / V.P. Rotshtein, Yu.F. Ivanov, D.I. Proskurovsky, K.V. Karlik, I.A. Shulepov, A.B. Markov // Surface and Coatings Technology. – 2004. – V. 180–181. – P. 382–386.
2. Microstructure and wear resistance of high-speed steel treated with intense pulsed ion beam / Mei Xian-xiu, Hao Sheng-zhi, Ma Teng-cai, Wang Ying-min, Liu Zhen-min // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2005. – V. 239. – P. 152–158.
3. Arai S., Kawahito Y., Katayama S. Effect of surface modification on laser direct joining of cyclic olefin polymer and stainless steel // Materials and design. – 2014. – № 59. – P. 448–453.
4. Surface modification of the patterned Al6061/SUS304 metal plates using the large electron beam / Dong Min Kim, Jisu Kim, Sung Soo Parc, Hyung Wook Park, Hyungson Ki // Applied Surface Science. – 2012. – № 261. – P. 458–463.
5. Surface modification of CoCrAlY coating by high-current pulsed electron beam treatment under the «evaporation» mode / Jie Cai, Qingfeng Guan, Peng Lv, Xiuli Hou, Zhiping Wang, Zhiyong Hank // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2014. – № 337. – P. 90–96.
6. Piccini J., Svoboda H. Effect of the plasma arc welding procedure on mechanical properties of DP700 steel // Procedia Materials Science. – 2012. – № 1. – P. 50–57.
7. Формирование структуры титана и коррозионно-стойкой стали при лазерной сварке / С.Ф. Гнусов, В.А. Клименов, Ю.В. Алхимов, А.Д. Будницкий, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, Ю.В. Афонин // Сварочное производство. – 2012. – № 1. – С. 17–22.
8. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding / Chen Guoqing, Fu Xuesong, Wei Yanhui, Li Shan, Zhou Wenlong // Surface & Coatings Technology. – 2013. – № 228. – P. 276–282.
9. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / под ред. Н.Н. Рыкалина, А.А. Углова, Н.В. Зуева, А.Н. Кокора – М.: Машиностроение, 1985. – 486 с.
10. Гнусов С.Ф., Дураков В.Г. Структурообразование композиционных покрытий «Сталь P6M5-(WC+TiC)» в зависимости от содержания карбида вольфрама в исходной шихте // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 322. – № 2. – С. 111–115.
11. Влияние исходной структуры и гранулометрического состава порошка на структуру металла 10P6M5, наплавленного плазменно-порошковым способом / И.А. Рябцев, Е.Ф. Переплетчиков, И.В. Миц, И.А. Бартнев // Автоматическая сварка. – 2007. – № 10. – С. 23–27.
12. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий / В.Е. Панин, С.И. Белюк, В.Г. Дураков, Г.А. Прибытков, Н.Г. Ремпе // Сварочное производство. – 2000. – № 2. – С. 34–38.
13. Rastkar A.R., Shokri B. Surface transformation of Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B titanium aluminide by electron beam melting // Surface & Coatings Technology. – 2010. – № 204. – P. 1817–1822.
14. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment / Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. // Surface & Coatings Technology. – 2014. – № 258. – P. 549–556.
15. Electron beam accelerators – trends in radiate on processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean / W.A. Parejo Calvo, C.L. Duarte et al. // Radiation Physics and Chemistry. – 2012. – № 81. – P. 1276–1281.
16. Структура и механические свойства металла вне-вакуумной электронно-лучевой наплавки до и после термической обработки / И.М. Полетика, Т.А. Крылова, М.В. Перовская, Ю.Ф. Иванов, С.Ф. Гнусов, М.Г. Голковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 4. – С. 44–53.

17. Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменно-порошковая наплавка режущего инструмента // Сварочное производство. – 2008. – № 11. – С. 28–31.
18. Гнусов С.Ф., Дураков В.Г. Электронный луч в формировании неравновесных структур. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 115 с.
19. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 659 с.
20. The effect of thermal cycling by electron-beam surfacing on structure and wear resistance of deposited M2 steel / S.F. Gnyusov, A.A. Ignatov, V.G. Durakov, S.Yu. Tarasov // Applied Surface Science. – 2012. – № 263. – P. 215–222.
21. Influence of rare earths on eutectic carbides in AISI M2 high speed steel / Zhou Xuefeng, Yin Xiaoyan, Jiang Jianqing, Zhu Wangl // Journal of rare earths. – 2012. – V. 30. – № 10. – P. 1075–1078.
22. Breakdown Behavior of Eutectic Carbide in High Speed Steel During Hot Compression / Zhou Bin, Shen Yu, Chen Lun, Cui Zhen-shan // Journal of iron and steel research, International. – 2011. – № 18. – P. 41–48.

Поступила 08.10.2014 г.

UDC 621.791.927.2

## INFLUENCE OF HEAT INPUT AT PLASMA POWDER SURFACING OF M2 STEEL ON STRUCTURE AND HARDNESS OF THE COATING. SINGLE ROLLER SURFACING (P. I)

**Ann A. Khaydarova,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: haydarova@tpu.ru

**Sergey Ph. Gnyusov,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gnusov@rambler.ru

*Heat input is a determining parameter in plasma surfacing. It can be controlled by welding current power and displacement rate of heating source. Increasing the heat input can affect significantly the formation of structure and properties of the deposited material. Therefore, the choice of plasma powder surfacing parameters, for example sealing ends, which are used for oil extraction pumps, oil transportation and oil refining, is relevant for restoration or hardening a part surface. The authors have carried out the single-pass plasma surfacing with industrial powder of M2 steel which had a particle size distribution about 100...350 microns on the rectangular 400×150×10 mm plate of steel C1020. Argon was used as the conveying, protective and plasma gas. Surfacing was performed on UPN-303UHL4. The authors used the plasma torch with an internal circuit of powder input into the arc. To change the heat input the authors used the modes with different values of current and deposition rate. The authors analyzed the influence of the heat input during plasma powder surfacing of a single roller on formation of its structural and phase composition and hardness. The microstructure evolution analysis was carried out using optical microscope Olympus GX 51, which has a set of application 700 SIAMS programs, and scanning high resolution electron microscope JSM-7500FA, equipped with energy dispersive microanalysis system manufactured by JEOL. The X-ray diffraction, which was carried out using X-ray diffractometer XRD-7000S in the filtered CuK $\alpha$ -radiation, was used in the work. It is shown that increasing heat input from 20 to 42 kJ/cm the width of the deposited bead increases twice and the depth of penetration of the base metal grows from 0,2 to 0,9 mm. It was found that when increasing the heat input the proportion of eutectic reduces in 2 times, increasing the amount of martensite in the matrix volume from 72 to 84 % and an average particle size of the vanadium carbide from 0,75 to 2 microns. A layer of material thickness of about 100... 150  $\mu$ m is formed near the fusion boundary and upper bead, where the increasing number of dispersed carbides to ~ 4 % is fixed and there is no eutectic net of carbides. When increasing heat input to 25 kJ/cm the average microhardness remains at 860 HV. Hardness decreases to 780...790 HB, when the heat input increases to 30 kJ/cm. Hardness remains unchanged with further increase of heat input.*

### **Key words:**

*Plasma powder surfacing, M2 steel powder surfacing, microstructure, eutectic, M<sub>6</sub>C and VC type carbides, hardness.*

*The research was financially supported by the State task of the Ministry of Education and Science of the RF for research at TPU no. 862.*

## REFERENCES

1. Rotshtein V.P., Ivanov Yu.F., Proskurovsky D.I., Karlik K.V., Shulepov I.A., Markov A.B. Microstructure of the near-surface layers of austenitic stainless steels irradiated with a low-energy, high-current electron beam. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 180–181, pp. 382–386.
2. Mei Xian-xiu, Hao Sheng-zhi, Ma Teng-cai, Wang Ying-min, Liu Zhen-min. Microstructure and wear resistance of high-speed steel treated with intense pulsed ion beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2005, vol. 239, pp. 152–158.
3. Arai S., Kawahito Y., Katayama S. Effect of surface modification on laser direct joining of cyclic olefin polymer and stainless steel. *Materials and design*, 2014, vol. 59, pp. 448–453.
4. Dong Min Kim, Jisu Kim, Sung Soo Parc, Hyung Wook Park, Hyungson Ki. Surface modification of the patterned Al6061/SUS304 metal plates using the large electron beam. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 261, pp. 458–463.
5. Jie Cai, Qingfeng Guan, Peng Lv, Xiuli Hou, Zhiping Wang, Zhiyong Hank. Surface modification of CoCrAlY coating by high-current pulsed electron beam treatment under the «evaporation» mode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2014, no. 337, pp. 90–96.
6. Piccini J., Svoboda H. Effect of the plasma arc welding procedure on mechanical properties of DP700 steel. *Procedia Materials Science*, 2012, no. 1, pp. 50–57.
7. Gnyusov S.F., Klimenov V.A., Alkhimov Yu.V., Budnitskii A.D., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Afonin Yu. Formirovanie struktury titana i korrozionnostoykoy stali pri lazernoy svarke [Formation of titanium structure and corrosion-resistant steel in laser welding]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2012, no. 1, pp. 17–22.
8. Chen Guoqing, Fu Xuesong, Wei Yanhui, Li Shan, Zhou Wenlong. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding. *Surface & Coatings Technology*, 2013, no. 228, pp. 276–282.
9. *Lasernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov* [Laser and electron beam processing of materials]. Eds. N.N. Rakalin, A.A. Uglov, N.V. Zuev, A.N. Kokora. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 486 p.
10. Gnyusov S.F., Durakov V.G. Structuroobrazovanie kompozitsionnykh pokrytiy «stal R6M5-(WC+TiC)» v zavisimosti ot sodержaniya karbida volframa v ishodnoy shikhte [Structure formation of composite coatings «Steel M2-(WC+TiC)» depending on tungsten carbide content in starting material]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 111–115.
11. Ryabtsev I.A., Perepletchikov I.A., Mits I.V., Bartenev I.A. Vliyaniye iskhodnoy struktury i granulometricheskogo sostava poroshka na strukturu metalla M2, naplavlennogo plazmenno-poroshkovym sposobom [The influence of the initial structure and the particle size distribution of the powder on the structure of 10R6M5 metal deposited by plasma-powder method]. *Avtomaticheskaya svarka*, 2007, no. 10, pp. 23–27.
12. Panin V.E., Belyuk S.I., Durakov V.G., Pribitkov G.A., Remppe N.G. Elektronno-luchevaya naplavka v vakuume: oborudovanie, tekhnologiya, svoystva pokrytiy [Electron beam welding in vacuum: equipment, technology, properties of coatings]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2000, no. 2, pp. 34–38.
13. Rastkar A.R., Shokri B. Surface transformation of Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B titanium aluminide by electron beam melting. *Surface & Coatings Technology*, 2010, no. 204, pp. 1817–1822.
14. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment. *Surface & Coatings Technology*, 2014, no. 258, pp. 549–556.
15. Parejo Calvo W.A., Duarte C.L. Electron beam accelerators – trends in radiate on processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, no. 81, pp. 1276–1281.
16. Poletika I.M., Krylova T.A., Perovskaya M.V., Ivanov Yu.F., Gnyusov S.F. Struktura i mekhanicheskie svoystva metalla vnevakuumnoy elektronno-luchevoy naplavky do i posle termicheskoy obrabotki [Structure and mechanical properties of a metal in vacuum-electron-beam deposition, before and after heat treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2008, no. 4, pp. 44–53.
17. Ryabtsev A., Perepletchikov I.A. Plazmenno-poroshkovaya naplavka rezhushchego instrumenta [Plasma powder surfacing of cutting tool]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2008, no. 11, pp. 28–31.
18. Gnyusov S.F., Durakov V.G. *Elektronnyy luch v formirovaniy neravnovesnykh struktur* [Electron beam in formation of nonequilibrium structures]. Tomsk, TPU Publ. house, 2012. 115 p.
19. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 659 p.
20. Gnyusov S.F., Ignatov A.A., Durakov V.G., Tarasov S.Yu. The effect of thermal cycling by electron-beam surfacing on structure and wear resistance of deposited M2 steel. *Applied Surface Science*, 2012, no. 263, pp. 215–222.
21. Zhou Xuefeng, Yin Xiaoyan, Jiang Jianqing, Zhu Wangl. Influence of rare earths on eutectic carbides in AISI M2 high speed steel. *Journal of rare earths*, 2012, vol. 30, no. 10, pp. 1075–1078.
22. Zhou Bin, Shen Yu, Chen Lun, Cui Zhen-shan. Breakdown Behavior of Eutectic Carbide in High Speed Steel During Hot Compression. *Journal of iron and steel research, International*, 2011, no. 18, pp. 41–48.

Received: 08 October 2014.



УДК 665.61:(547.83.+547.73)

## НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ АЗОТИСТЫЕ ОСНОВАНИЯ И СЕРНИСТЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ВЫСОКОПАРАФИНИСТЫХ ВЫСОКОСМОЛИСТЫХ НЕФТЯХ

**Аюрова Анара Майрамбековна,**

аспирант лаборатории гетероорганических соединений нефти  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт химии нефти» Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: dm@ipc.tsc.ru

**Герасимова Наталья Николаевна,**

канд. хим. наук, доцент, ст. науч. сотр. лаборатории гетероорганических  
соединений нефти Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт химии нефти» Сибирского отделения  
Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический,  
4. E-mail: dm@ipc.tsc.ru

Актуальность работы обусловлена важностью накопления и систематизации данных о содержании и составе гетероатомных компонентов в высокопарафинистых высокосмолистых нефтях для эффективного решения проблем их добычи, транспорта и переработки.

**Цель работы:** изучение характера распределения и состава низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений в нефтях, обогащенных твердыми парафинами и смолисто-асфальтеновыми веществами.

**Методы исследования:** термохимическая деструкция в реакторе Покровского и сожжение по Шенигеру, неводное потенциометрическое титрование, сернокислотная экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография на модифицированных сорбентах, инфракрасная спектроскопия хромато-масс-спектрометрия.

**Результаты.** Выявлены различия и сходства в распределении и составе углеводородов и низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений в высокопарафинистых высокосмолистых нефтях, близких по содержанию смолисто-асфальтеновых веществ, но с различным содержанием твердых парафинов. Установлено, что изученные нефтяные образцы характеризуются сходным молекулярно-массовым распределением алифатических углеводородов. В обеих нефтях в их составе присутствуют *n*-алканы от  $C_{12}$  до  $C_{34}$ , с максимальным содержанием  $C_{17}$ . Показано, что среди низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений высокопарафинистых высокосмолистых нефтей присутствуют высоко- и малоалкилированные структуры. При незначительных различиях в относительном содержании последних в более парафинистой нефти существенно выше доля более алкилированных соединений. Качественный состав малоалкилированных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений высокопарафинистых высокосмолистых нефтей не связан с содержанием в них твердых парафинов и смолисто-асфальтеновых веществ. В обоих образцах такие гетероатомные компоненты представлены  $C_3$ - $C_8$  хинолинами,  $C_1$ - $C_6$  бензохинолинами,  $C_1$ - $C_6$  дибензохинолинами,  $C_2$ - $C_4$  бензотиофенами,  $C_0$ - $C_4$  дибензотиофенами и  $C_0$ - $C_1$  нафтобензотиофенами. В то же время максимум распределения идентифицированных соединений в более парафинистом образце сдвинут в сторону структур с большими размерами ароматического ядра (бензохинолины, нафтобензотиофены).

### Ключевые слова:

Нефть, парафины, смолисто-асфальтеновые вещества, *n*-алканы, хинолины, бензохинолины, дибензохинолины, бензотиофены, дибензотиофены, нафтобензотиофены, распределение, состав.

### Введение

В общем объеме запасов жидких углеводородов в последние годы наблюдается неуклонное увеличение доли нефтей, обогащенных твердыми парафинами (ТП) и смолисто-асфальтеновыми веществами (САВ) [1–8]. Повышенное содержание ТП способствует их выпадению из нефтяного раствора и образованию, совместно с асфальтенами и смолами, отложений, снижающих эффективность добычи и транспорта нефтей [4, 7, 8]. Для высокосмолистых нефтей характерно высокое содержание гетероатомных компонентов, в частности азотсодержащих оснований (АО) и сернистых соединений (СС) [9]. Являясь природными поверхностно-активными веществами, они оказывают заметное влияние на поведение нефтяной дисперсной системы в условиях нефтяной залежи и при техногенном воздействии на нефтяные флюиды [9–11]. Кроме того, низкомолекулярные ароматиче-

ские АО и СС негативно воздействуют на каталитические процессы нефтепереработки, качество товарных нефтепродуктов и окружающую среду [12–15]. Следовательно, для разработки процессов рационального использования высокопарафинистых высокосмолистых нефтей необходимо накопление и систематизация данных о распределении и составе в них гетероатомных компонентов.

Целью настоящей работы является изучение характера распределения и состава низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений в высокопарафинистых высокосмолистых нефтях.

### Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на нефтяных образцах с повышенным содержанием ТП и САВ (образец 1 и образец 2).

Экспериментальные данные получены на оборудовании центра коллективного пользования Томского научного центра СО РАН.

Общее содержание серы ( $S_{\text{общ.}}$ ) и азота ( $N_{\text{общ.}}$ ) определяли сжиганием по Шенигеру [16] и окислительной деструкцией в реакторе Покровского [17], соответственно, содержание основного азота ( $N_{\text{осн.}}$ ) – методом неводного потенциометрического титрования [18].

Низкомолекулярные АО экстрагировали из деасфальтизированных нефтей уксуснокислым раствором серной кислоты с массовым соотношением минеральной и органической кислот и воды, равным 25:37,5:37,5 [19]. Выделенные соединения фракционировали на оксиде кремния, модифицированном NaOH, при массовом соотношении образец: адсорбент 1:100. Исчерпывающую десорбцию осуществляли растворителями с элюирующей силой ( $\epsilon_{\text{AB}}^0$ ), равной 0,20 и 0,60 [20].

Низкомолекулярные СС выделяли из нефтяных деасфальтизатов методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде кремния, модифицированном NiCl<sub>2</sub>, при массовом соотношении образец: адсорбент, равном 1:100. В качестве элюентов последовательно использовали гексан, бензол и смесь бензола, этанола и хлороформа (1:1:1 по объему) [21].

ИК спектры получали на FTIR-спектрометре «NICOLET 5700» в области 4000...400 см<sup>-1</sup>. Образцы растворяли в CCl<sub>4</sub>, наносили на пластинки из KBr, полученные пленки высушивали.

Состав углеводородов, АО и СС исследовали методом хромато-масс-спектрометрии (ХМС) на DFS приборе «Thermo Scientific». В газовом хроматографе использовали кварцевую капиллярную колонку TR5MS длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм. Хроматографирование проводили в режиме программированного подъема температуры от 80 до 300 °С со скоростью 4 град/мин и затем в течение 30 мин при конечной температуре. Газ-носитель – гелий. Сканирование масс-спектров осуществлялось каждую секунду в диапазоне масс до 500 а.е.м. Результаты ХМС анализа обрабатывали с помощью программы Xcalibur. Для идентификации индивидуальных соединений использовали компьютерную библиотеку масс-спектров NIST 02, литературные данные [22–24] и характер ионной фрагментации структур при электронном ударе. Относительную распространенность каждого отдельного соединения оценивали как отношение его содержания к суммарному содержанию всех идентифицированных соединений.

### Результаты и их обсуждение

Характеристики исследованных нефтей приведены в табл. 1. В соответствии с известными классификациями [25–27] обе нефти являются тяжелыми (плотность >884,0 кг/м<sup>3</sup>), высокопарафинистыми (ТП >6 мас. %) и высокосмолистыми (САВ >15 мас. %). Нефтяные образцы близки по содержанию САВ (25,5 и 26,9 мас. %), но значи-

тельно отличаются по содержанию ТП (10,0 и 20,9 мас. %).

Таблица 1. Характеристика нефтей

Table 1. Oil characteristic

Объект Object	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Содержание, мас. %/Content, wt. %				
		ТП/SP	САВ/RAM	S <sub>общ.</sub>	N <sub>общ.</sub>	N <sub>осн.</sub>
образец 1 sample 1	901,0	10,0	26,9	0,93	0,18	0,05
образец 2 sample 2	916,9	20,9	25,5	0,23	0,26	0,08

SP are solid paraffins

RAM are resinous-asphaltenic materials

Однако различие в концентрации парафинов не оказывает влияния на качественный состав алифатических углеводородов исследуемых нефтей. Так, методом ХМС установлено, что n-алканы обоих образцов представлены соединениями состава C<sub>12</sub>–C<sub>34</sub> с унимодальным молекулярно-массовым распределением и максимумом на C<sub>17</sub> (рис. 1).

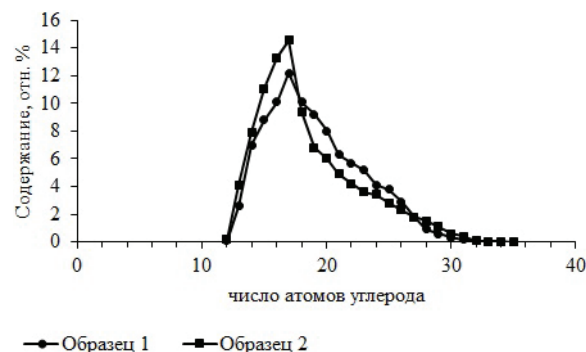


Рис. 1. Молекулярно-массовое распределение n-алканов

Fig. 1. Molecular mass distribution of n-paraffins

Из данных элементного и функционального анализов (табл. 1) следует, что образец 1 является сернистым ( $S_{\text{общ.}}=0,51\text{--}2,0$  мас. %), образец 2 – малосернистым ( $S_{\text{общ.}}\leq 0,50$  мас. %) [25–27]. Содержание  $N_{\text{общ.}}$  и  $N_{\text{осн.}}$  в первом образце ниже (0,18 и 0,05 мас. %), чем во втором (0,26 и 0,08 мас. %).

### Азотистые основания

Результаты экстракции низкомолекулярных АО приведены в табл. 2. Из них следует, что выход концентрата (К) из образца 1 выше, чем из образца 2. В обоих случаях в составе полученных продуктов присутствуют только сильные основания. На это указывает равенство концентраций общего и основного азота. В соответствии с особенностями применяемой методики [19, 28] такие сильные АО представлены ароматическими структурами со слабо развитым алкильным обрамлением (число алкильных атомов углерода не превышает 10). С выделенными соединениями связано 2,5 и 3,8 отн. % основного азота исследуемых нефтей. При этом меньшая доля характерна для более парафинистого нефтяного образца 2.

**Таблица 2.** Выделение низкомолекулярных азотистых оснований  
**Table 2.** Extraction of low molecular nitrogen bases

Объект Object	Выход К, мас. % Concentrate (C) extrac- tion, wt. %	Содержание/Content		
		N <sub>общ.</sub> , мас. % (wt. %)	N <sub>осн.</sub> , мас. % (wt. %)	Доля N <sub>осн.</sub> отн. N <sub>осн.</sub> нефти, % Part of N <sub>осн.</sub> relative to oil N <sub>осн.</sub> %
Образец 1 Sample 1	0,071	2,68	2,68	3,8
Образец 2 Sample 2	0,059	3,47	3,44	2,5

По данным ИК спектроскопии экстрагируемые АО являются производными пиридина, среди которых присутствуют азотсодержащие кислоты. На это указывает дуплет полос поглощения в области 1600...1500 см<sup>-1</sup> и полосы поглощения гидроксильных (3291...3200 см<sup>-1</sup>) и карбонильных (1723...1708 см<sup>-1</sup>) фрагментов карбоксильной группы. Наличие кислотной функции в структуре ароматических гетероциклических АО установлено в ряде научных работ [29, 30].

Для отделения карбоксилсодержащих АО выделенные из нефтяных образцов концентраты подвергли хроматографическому разделению на модифицированном сорбенте [20]. Из каждого концентрата были получены по две фракции (Ф-1 и Ф-2). Сравнительный анализ спектральных данных показал, что полосы поглощения, характерные для карбоксильных групп, проявляются только в ИК спектрах фракций Ф-2. В составе АО фракций Ф-1 азотсодержащие кислоты отсутствуют. Оба образца характеризуются высоким выходом этих фракций, однако для более парафинистого нефтяного образца 2 он существенно выше (табл. 3).

**Таблица 3.** Хроматографическое разделение низкомолекулярных азотистых оснований

**Table 3.** Chromatographic separation of low molecular nitrogen bases

Продукт Product	ε <sub>AB</sub> <sup>0</sup>	Выход относительно К, % Yield relative to C, %	
		Образец 1/Sample 1	Образец 2/Sample 2
Ф-1	0,20	50,0	93,3
Ф-2	≥0,60	50,0	6,7

По данным ХМС анализа в составе оснований фракций Ф-1 в обоих образцах идентифицированы одинаковые наборы алкилпроизводных хинолина, бензохинолина и дибензохинолина (табл. 4) Максимум в распределении этих соединений в образце 1 приходится на алкилхинолины, в образце 2 – на алкилбензохинолины. Алкилдибензохинолины в обоих случаях присутствуют в меньших количествах.

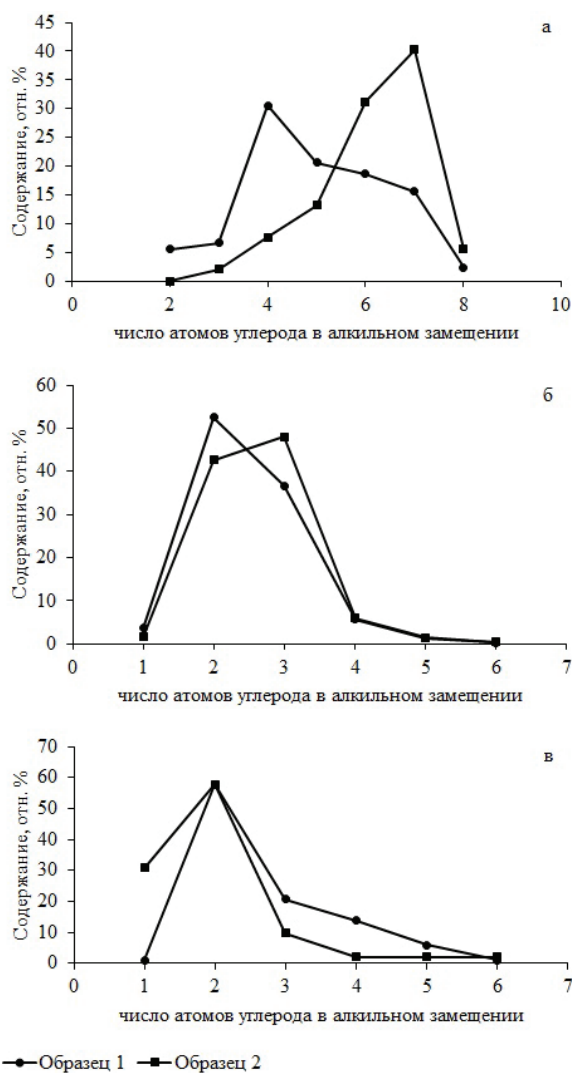
В ряду алкилхинолинов образца 1 преобладают гомологи C<sub>4</sub> (m/z=185), в образце 2 повышено относительное содержание гомологов C<sub>7</sub> (m/z=227) (рис. 2, а). Характер молекулярно-массового распределения алкилбензохинолинов (рис. 2, б) и алкилдибензохинолинов (рис. 2, в) в обоих образцах

сходен. Среди трициклических АО доминируют гомологи C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub> (m/z=207–221), среди тетрациклических – C<sub>2</sub> (m/z=257).

**Таблица 4.** Состав низкомолекулярных ароматических азотистых оснований

**Table 4.** Structure of low molecular aromatic nitrogen bases

Соединения Compounds	Эмпирическая формула Empirical formula	Содержание относительно идентифицированных соединений, % Content relative to the identified compounds, %	
		Образец 1 Sample 1	Образец 2 Sample 2
Алкилхинолины Alkyl-quinolines	C <sub>n</sub> H <sub>2n-11</sub> N	50,8	14,4
Алкилбензохинолины Alkyl-benzoquinolines	C <sub>n</sub> H <sub>2n-17</sub> N	30,3	80,4
Алкилдибензохинолины Alkyl-dibenzoquinolines	C <sub>n</sub> H <sub>2n-23</sub> N	18,9	5,2



**Рис. 2.** Распределение алкилхинолинов (а), алкилбензохинолинов (б) и алкилдибензохинолинов (в)

**Fig. 2.** Distribution of alkyl-quinolines (a), alkyl-benzoquinolines (б), and alkyl-dibenzoquinolines (в)

Одноименные типы оснований в исследованных нефтяных образцах имеют сходный изомерный состав, о чем свидетельствует отсутствие различий в их масс-хроматограммах. На рис. 3 в качестве примеров приведены масс-хроматограммы  $C_2$ -бензохинолинов по иону с отношением масса/заряд ( $m/z$ ), равным 207. По характеру их фрагментации можно сделать вывод, что в составе идентифицированных алкилбензохинолинов присутствуют структуры только с метильными заместителями. Сравнение с литературными данными [23] позволило установить среди них высокостабильные структуры, содержащие заместители в положении, ближайшем к атому азота: 2,3-диметилбензо (h) хинолин (рис. 3, пик 3) и 2,4-диметилбензо (h) хинолин (рис. 3, пик 4). Доминирует среди изомеров в обоих нефтях 2,4-диметилбензо (h) хинолин.

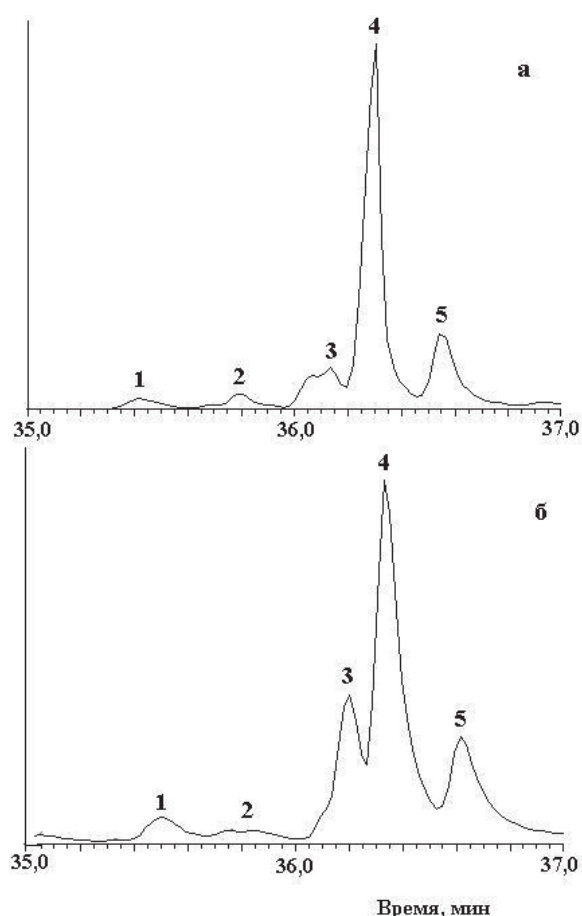


Рис. 3. Масс-хроматограммы  $C_2$ -алкилбензохинолинов по иону с  $m/z=207$  образца 1 (а) и образца 2 (б)

Fig. 3. Mass-chromatograms of  $C_2$ -alkyl-benzoquinolines by an ion with  $m/z=207$  of the sample 1(а) and sample 2 (б)

### Серосодержащие соединения

При разделении деасфальтизированных нефтяных образцов на модифицированном сорбенте СС распределяются по трем хроматографическим фракциям. В соответствии с применяемой методикой [21] в гексановые фракции (Ф-1) элюируются, главным образом низкомолекулярные высокоалки-

лированные соединения, в бензольные фракции (Ф-2) – низкомолекулярные малоалкилированные ароматические структуры, во фракции (Ф-3) – сложная смесь полярных гетероатомных компонентов.

Из данных, представленных в табл. 5, следует, что исследуемые нефтяные образцы заметно различаются по относительному содержанию общей серы в продуктах Ф-1 и Ф-3. Наиболее существенное отличие наблюдается для Ф-1. Доля серы, связанной с высокоалкилированными соединениями образца 2 (48,6 отн. %), почти в 3 раза превышает долю серы в аналогичных структурах образца 1 (17,3 отн. %). Различия по относительному содержанию серы, связанной с малоалкилированными ароматическими структурами фракций Ф-2, не столь значительны (43,1 и 31,6 отн. %). Более высокое значение для Ф-2 нефтяного образца 1, вероятно всего, связано с его общей сернистостью. Известно [24], что в сернистых нефтях доля ароматических серосодержащих структур выше, чем в малосернистых.

Таблица 5. Хроматографическое выделение сернистых соединений

Table 5. Chromatographic extraction of sulphur compounds

Продукт Product	Образец 1/Sample 1			Образец 2/Sample 2		
	Выход, мас. % Yield, wt. %	$S_{общ}$		Выход, мас. % Yield, wt. %	$S_{общ}$	
		мас. % wt. %	относительно $S_{общ}$ неф- ти, % Relative to oil $S_{общ}$ , %		мас. % wt. %	относительно $S_{общ}$ неф- ти, % Relative to oil $S_{общ}$ , %
Ф-1	63,1	0,25	17,3	69,9	0,16	48,6
Ф-2	18,4	2,18	43,1	12,2	0,60	31,6
Ф-3	15,3	1,94	31,9	15,1	0,29	19,0

ХМС анализ фракций Ф-2 показал, что в составе низкомолекулярных ароматических СС исследуемых образцов присутствуют бензо-, дибензо- и нафтобензотиофены (табл. 6). В образце 1 максимально содержание дибензотиофенов, в образце 2 преобладают нафтобензотиофены.

Бензотиофены в обоих образцах представлены алкилированными соединениями  $C_2-C_4$  ( $m/z=162-190$ ). Максимум распределения приходится на гомологи  $C_4$  ( $m/z=190$ ), в составе которых идентифицированы диметилэтил- и диэтилбензотиофены [24].

Среди дибензотиофенов установлен сам дибензотиофен ( $m/z=184$ ) и его  $C_1-C_4$  ( $m/z=198-240$ ) гомологи с максимумом распределения на  $C_1$  ( $m/z=198$ ). В составе алкилзамещенных структур присутствуют 1-, 2-, 3-, 4-метил-, 2,4-, 4,6-диметил- и 2-, 4-этилдибензотиофены.

В ряду нафтобензотиофенов обоих образцов идентифицированы гомологи  $C_0-C_1$  ( $m/z=234-248$ ), а в образце 2 дополнительно –  $C_2$  ( $m/z=262$ ). Преобладают голаядерные структуры, которые представлены: [2,1-b]-, [1,2-b]-, [2,3-d] нафтобензотиофенами.

**Таблица 6.** Состав низкомолекулярных ароматических сернистых соединений

**Table 6.** Composition of low molecular aromatic sulphur compounds

Соединения Compounds	Эмпири- ческая формула Empirical formula	m/z	Содержание, отн. % Content, rel. %	
			Образец 1 Sample 1	Образец 2 Sample 2
<b>Алкилбензотиофены: Alkyl-benzothiophenes:</b>			<b>8,9</b>	<b>4,8</b>
C <sub>2</sub>	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> S	162	1,0	1,1
C <sub>3</sub>	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> S	176	3,3	1,7
C <sub>4</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> S	190	4,6	2,0
<b>Алкилдибензотиофены: Alkyl-dibenzothiophenes:</b>			<b>84,7</b>	<b>8,9</b>
C <sub>0</sub>	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> S	184	23,8	0,2
C <sub>1</sub>	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> S	198	28,0	7,7
C <sub>2</sub>	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> S	212	21,3	0,5
C <sub>3</sub>	C <sub>15</sub> H <sub>14</sub> S	226	8,6	0,3
C <sub>4</sub>	C <sub>16</sub> H <sub>16</sub> S	240	3,0	0,2
<b>Алкилнафтобензотиофены: Alkyl-naftobenzothiophenes:</b>			<b>6,4</b>	<b>86,3</b>
C <sub>0</sub>	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub> S	234	4,9	67,6
C <sub>1</sub>	C <sub>17</sub> H <sub>12</sub> S	248	1,5	11,0
C <sub>2</sub>	C <sub>18</sub> H <sub>14</sub> S	262	Отс.	7,7

### Заключение

Анализ результатов проведенного исследования позволил выявить различия и сходства в распределении и составе углеводородов и низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и

сернистых соединений в высокопарафинистых высокосмолистых нефтях, близких по содержанию смолисто-асфальтеновых веществ, но с различным содержанием твердых парафинов.

Установлено, что:

- изученные нефтяные образцы характеризуются сходным молекулярно-массовым распределением алифатических углеводородов. В обоих нефтяных образцах в их составе присутствуют n-алканы C<sub>12</sub>-C<sub>34</sub>, с максимальным содержанием C<sub>17</sub>.
- среди низкомолекулярных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений высокопарафинистых высокосмолистых нефтей присутствуют высоко- и малоалкилированные структуры. При незначительных различиях в относительном содержании последних, в более парафинистой нефти существенно выше доля высокоалкилированных соединений.
- качественный состав малоалкилированных ароматических азотистых оснований и сернистых соединений высокопарафинистых высокосмолистых нефтей не связан с содержанием в них твердых парафинов и смолисто-асфальтеновых веществ. В обоих образцах такие гетероатомные компоненты представлены C<sub>3</sub>-C<sub>8</sub> хинолинами, C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> бензохинолинами, C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub> дибензохинолинами, C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> бензотиофенами, C<sub>0</sub>-C<sub>4</sub> дибензотиофенами и C<sub>0</sub>-C<sub>1</sub> нафтобензотиофенами. В то же время максимум распределения идентифицированных соединений в более парафинистом образце сдвинут в сторону структур с большими размерами ароматического ядра (бензохинолины, нафтобензотиофены).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запивалов Н.П. Нефтегазовый комплекс России: состояние и перспективы на XXI век // Георесурсы. – 2002. – № 1. – С. 32–35.
2. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химические технологии увеличения нефтеотдачи месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Нефть и газ Сибири. – 2012. – № 3. – С. 80–83.
3. Золотухин В.А. Глубокая переработка тяжелой нефти и нефтяных остатков. Электронный архив. URL: <http://www.ngfr.ru/article.html.106> (дата обращения 15.10.2014).
4. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 1. – С. 268–284.
5. Макаревич В.Н., Искрицкая Н.И., Богословский С.А. Ресурсный потенциал месторождений тяжелых нефтей Европейской части Российской Федерации // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 3. Научный электронный архив. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/6/43\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/6/43_2012.pdf) (дата обращения: 24.10.2014).
6. Новая технология комплексного термохимического воздействия на карбонатные коллектора, содержащие вязкую нефть / А.Ф. Шагеев, О.В. Лукьянов, М.А. Шагеев, Р.С. Яруллин, И.И. Иванова, Б.Я. Маргулис, А.В. Семенов // Георесурсы. – 2012. – № 4 (46). – С. 22–25.

7. Герасимова Н.Н., Коваленко Е.Ю. Насыщенные и ароматические соединения высокопарафинистой нефти и органического отложения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 145–149.
8. Ганеева Ю.М. Надмолекулярная структура высокомолекулярных компонентов нефти и её влияние на свойства нефтяных систем: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Казань, 2013. – 42 с.
9. Камьянов В.Ф., Аксенов В.С., Титов В.И. Гетероатомные компоненты нефтей. – Новосибирск: Наука, 1983. – 238 с.
10. Герасимова, Н.Н., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А. Катионоактивные ПАВ остаточных нефтей // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 5. – С. 59–61.
11. Сафиева Р.З. Химия нефти и газа. Нефтяные дисперсные системы: состав и свойства (Ч. 1). – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 112 с.
12. Герасимова Н.Н., Сагаченко Т.А. Азотсодержащие основания дизельной фракции 140–350 °С товарной смеси юрских нефтей Западной Сибири до и после гидроочистки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 97–99.
13. Исследование состава и реакционной способности сернистых соединений в процессе гидрообессеривания дизельного топлива / Б.Л. Лебедев, С.А. Логинов, Л.О. Коган, Е.В. Лобзин, В.М. Капустин, А.И. Луговской, К.Б. Рудяк // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2001. – № 11. – С. 62–67.
14. Баргий Е.И., Нежаев А.И. Нефтехимия и защита окружающей среды // Нефтехимия. – 1999. – Т. 39. – № 2. – С. 83–97.

15. Characterization of Nitrogen Compounds in Coker Heavy Gas Oil and Its Subfractions by Liquid Chromatographic Separation Followed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry / X. Zhu, Q. Shi, Y. Zhang, N. Pan, Ch. Xu, K.H. Chung, S. Zhao // *Energy Fuels*. – 2011. – № 25. – P. 281–287.
16. Климова В.А. Основные микрометоды анализа органических соединений. – М.: Химия, 1975. – 658 с.
17. Определение азота в нефтях и нефтепродуктах / М.Н. Чумаченко, Т.А. Хандрик, Н.П. Соснина, В.А. Воронникова // *Химия и технология топлив и масел*. – 1983. – № 5. – С. 39–40.
18. Безингер Н.Н., Гальперн Г.Д. Функциональный анализ азотистых оснований и амидов и групповой анализ азотистых соединений нефти // В сб.: *Методы анализа органических соединений нефти, их смесей и производных* / отв. ред. Г.Д. Гальперн. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 141–169.
19. Выделение и фракционирование азотистых оснований из нефти / Н.Н. Герасимова, Т.А. Сагаченко, О.А. Бейко, В.Д. Огородников // *Нефтехимия*. – 1987. – Т. 27. – № 1. – С. 32–38.
20. Азотсодержащие основания тяжелой нефти месторождения Ван-Еганское / Е.Ю. Коваленко, Н.Н. Герасимова, Т.А. Сагаченко, Е.Б. Голушкова // *Химия и технология топлив и масел*. – 2001. – № 4. – С. 33–35.
21. Кузьменко И.С., Мин Р.С. Закономерности хроматографического разделения серосодержащих соединений с использованием хлоридов металлов // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 1999. – № 7. – С. 169–173.
22. Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in Fuels // *Mass-Spectrometry Reviews*. – 1985. – № 4. – P. 87–121.
23. Bakel A.J., Philp R.P. Distribution and quantitation of organonitrogen compounds in crude oils and rock pyrolysis // *Org. Geochem.* – 1990. – V. 16. – № 1–3. – P. 353–367.
24. Сергун В.П., Мин Р.С. Сернистые соединения в нефтях юрско-палеозойского комплекса Западной Сибири // *Нефтехимия*. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 86–91.
25. Ковешников А.Е. Геология нефти и газа. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.
26. Никитин Е.Е. Нефтяное товароведение. – СПб: Изд-во СПбГИ-ЭУ (Инжэкон), 2008. – 92 с.
27. Камьянов В.Ф. Основы химии нефти. Ч. I. – Томск: Изд-во ТГУ, 1981. – 132 с.
28. Групповой состав низкомолекулярных азотистых оснований самотлорской нефти / Ю.П. Туров, Н.Н. Герасимова, Т.А. Сагаченко, О.А. Бейко // *Нефтехимия*. – 1987. – Т. 27. – № 1. – С. 39–44.
29. Солиенко О.В. Применение ИК-спектроскопии в исследовании нефтей и нефтепродуктов // В сб. *Инструментальные методы исследования нефти* / под ред. Г.В. Иванова. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 18–41.
30. Jewell D.M. The role of nonhydrocarbons in the analysis virgin and biodegraded petroleum // *Petroleum in the marine environment. Adv. in Chem.* – 1980. – Ser. 185. – P. 219–232.

Поступила 16.01.2015 г.

UDC 665.61:(547.83.+547.73)

## LOW-MOLECULAR NITROGENOUS BASES AND SULPHUROUS COMPOUNDS OF HIGHLY PARAFFINIC AND HIGHLY RESINOUS OILS

Anara M. Ayurova,

Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: dm@ipc.tsc.ru

Natalia N. Gerasimova,

Institute of Petroleum Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: dm@ipc.tsc.ru

*Relevance of the research is caused by the importance of accumulation and systematization of data on the content and structure of heteroatomic components in high-paraffinic high-resinous oils for the effective solution of the problems of production, transport and processing of such alternative hydrocarbonic raw materials.*

**The aim of the research is to study the nature of distribution and structure of low-molecular aromatic heterocyclic nitrogen-containing bases and sulfur-containing compounds in oils with the raised content of solid paraffin hydrocarbons and resin-asphaltene substances.**

**The methods used in the study:** thermochemical degradation in the Pokrovsky reactor and Sheniger's burning, non-aqueous potentiometric titration, sulfuric acid extraction, liquid-adsorption chromatography over modified sorbents, IR-spectroscopy, GC-MS analysis.

**The results.** The authors have determined the differences and similarities in distribution and composition of low molecular weight hydrocarbons and aromatic nitrogen bases and sulfur compounds in high-paraffin and high-resin oils with similar content of resin-asphaltene substances but different content of paraffin waxes. It was found out that the investigated oil samples are characterized by similar molecular mass distributions of aliphatic hydrocarbons. Both oils contain n-alkanes from C<sub>12</sub> to C<sub>34</sub> and a maximum amount of C<sub>17</sub> in their compositions. It was shown that there are high- and low-alkylated structures among low molecular aromatic nitrogen bases and sulfur compounds of high-paraffin and high-resin oils. With minor differences in the relative abundance of the latter, the fraction of compounds with a higher alkylation degree was significantly larger in higher-paraffin oil. The qualitative composition of low-alkylated aromatic nitrogen bases and sulfur compounds of high-paraffin and high-resin oils was found to be independent on their content in paraffin waxes and resin-asphaltene substances. In both samples, these heteroatomic components are represented by C<sub>3</sub>–C<sub>8</sub> quinolines, C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub> benzoquinolines, C<sub>1</sub>–C<sub>6</sub> dibenzoquinolines, C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> benzothiophenes, C<sub>0</sub>–C<sub>4</sub> dibenzothiophenes and C<sub>0</sub>–C<sub>1</sub> naphthobenzothiophenes. At the same time, the distribution maximum for these compounds in the higher-paraffin sample is shifted towards the structures with a big aromatic-core size (benzoquinolines, naphthobenzothiophenes).

### Key words:

Oil, paraffin, resin-asphaltene substances, n-alkanes, quinolines, benzoquinolines, dibenzoquinolines, benzothiophenes, dibenzothiophenes, naphthobenzothiophenes, distribution, structure.

## REFERENCES

- Zapivalov N.P. Neftegazovy kompleks Rossii: sostoyaniye i perspektivy na XXI vek [Oil and gas complex of Russia: state and prospects for the XXI century]. *Georesursy*, 2002, no. 1, pp. 32–35.
- Altunina L.K., Kuvshinov V.A. Fiziko-khimicheskie tekhnologii uvelicheniya nefteotdachi mestorozhdeny s trudnoizvlekayemyimi zapasami [Physical and chemical technologies of increase in oil recovery of fields with hardly removable stocks]. *Neft i gaz Sibiri*, 2012, no. 3, pp. 80–83.
- Zolotukhin V.A., Glubokaya pererabotka tyazhelyoy nefti i neftyanykh ostatkov [Deep processing of heavy oil and oil residues]. Available at: <http://www.ngfr.ru/article.html?106> (accessed 15 October 2014).
- Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asfaltosmoloparafinovye otlozheniya v protsessakh dobychi, transporta i khraneniya [Asfaltene-rezin-paraffin deposits in the processes of oil production, transportation and storage]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoye delo*, 2011, no 1, pp. 268–284.
- Makarevich V.N., Iskrikskaya N.I., Bogoslovsky S.A. Resursnyy potentsial mestorozhdeny tyazhelykh neftey Evropeyskoy chasti Rossyskoy Federatsii [Resource potential of heavy oils fields in European part of the Russian Federation]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* 2012, vol. 7, no. 3. Available at: [http://www.ngtp.ru/rub/6/43\\_2012.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/6/43_2012.pdf) (accessed 24 October 2014).
- Shageev A.F., Lukyanov O.V., Shageev M.A., Yarullin R.S., Ivanova I.I., Margulis B.Ya. Semenov A.V. Novaya tekhnologiya kompleksnogo termokhimicheskogo vozdeystviya na karbonatnyye kollektora, sodержashchie vyzkuyu nef't [New technology of complex thermochemical influence on carbonate collectors, containing viscous oil]. *Georesursy*, 2012, no. 4 (46), pp. 22–25.
- Gerasimova N.N., Kovalenko E.Yu. Nasyshchennyye i aromatischekiye soedineniya vysokoparafinistoy nef'ti i organicheskogo otlozheniya [Saturated and aromatic compounds of high-paraffinic oil and organic adjournment]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 145–149.
- Ganeeva Yu.M. *Nadmolekulyarnaya struktura vysokomolekulyarnykh komponentov nef'ti i ee vliyaniye na svoystva nef'tyanykh sistem*. Avtoref. Dokt. Diss. [Supramolecular structure of high-molecular components of oil and its influence on properties of oil systems. Dr. Diss. Abstract]. Kazan, 2013. 42 p.
- Kamyanov V.F., Akse'nov V.S., Titov V.I. *Geteroatomnyye komponenty nef'tey* [Heteroatomic components of the oils]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 238 p.
- Gerasimova N.N., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A. Kationoaktivnyye PAV ostatochnykh nef'tey [Cation-active surfactant of residual oils]. *Nef'tyanoye khozyaystvo*, 1998, no. 5, pp. 59–61.
- Safieva R.Z. *Khimiya nef'ti i gaza. Nef'tyanye dispersnyye sistemy: sostav i svoystva (Ch. 1)* [Oil and gas chemistry. Oil disperse systems: structure and properties (P. 1)]. Moscow, RGU nef'ti i gaza im. I.M. Gubkina, 2004. 112 p.
- Gerasimova N.N., Sagachenko T.A. Azotsoderzhashchiye osnovaniya dizelnoy fraktsii 140–350 °C tovarnoy smesi yurskikh nef'tey Zapadnoy Sibiri do i posle gidroochistki [Nitrogen-containing foundations of diesel fraction 140–350 °C of Jurassic oils commodity mix of Western Siberia before hydrotreating]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 97–99.
- Lebedev B.L., Loginov S.A., Kogan K.O., Lobzin E.V., Kapustin V.M., Lugovskoy A.I., Rudyak K.B. Issledovaniye sostava i reaktivnosposobnosti sernistykh soyedineniy v protsesse gidroobesserivaniya dizelnogo topliva [Research of structure and reaction ability of sulphurous connections in the course of hydrodesulphurization of diesel fuel]. *Nef'tepererabotka i nef'tekhimiya*, 2001, no. 11, pp. 62–67.
- Bagriy E.I., Nekhaev A.I. Nef'tekhimiya i zashchita okruzhayushchey sredy [Petrochemistry and environment protection]. *Petroleum Chemistry*, 1999, vol. 39, no. 2, pp. 83–97.
- Zhu X., Shi Q., Zhang Y., Pan N., Xu Ch., Chung K. H., Zhao S. Characterization of Nitrogen Compounds in Coker Heavy Gas Oil and Its Subfractions by Liquid Chromatographic Separation Followed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *Energy Fuels*, 2011, no. 25, pp. 281–287.
- Klimova V.A. *Osnovnyye mikrometody analiza organicheskikh soyedineniy* [Main micromethods of the analysis of organic compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 207 p.
- Chumachenko M.N., Khandrik T.A., Sosnina N.P., Vorotnikova V.A. Opredeleniye azota v nef'tyakh i nef'teproduktakh [Definition of nitrogen in the oils and oil products]. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 1983, no. 5, pp. 39–40.
- Bezinger N.N., Galpern G.D. Funktsionalnyy analiz azotistykh osnovany i amidov i gruppovoy analiz azotistykh soyedineniy nef'ti [Functional analysis of the nitrogenous bases and amides and group analysis of nitrogenous compounds of oil]. *Metody analiza organicheskikh soyedineniy nef'ti, ikh smesey i proizvodnykh* [Methods for analyzing oil organic compounds, their mixtures and derivatives]. Ed. by G.D. Galpern. Moscow, AN SSSR Press, 1960. pp. 141–169.
- Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Beyko O.A., Ogorodnikov V.D. Vydeleniye i fraktsionirovaniye azotistykh osnovany iz nef'ti [Allocation and fractionation of the nitrogenous bases from oil]. *Petroleum Chemistry*, 1987, vol. 27, no. 1, pp. 32–38.
- Kovalenko E.Yu., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Golushkova E.B. Azotsoderzhashchiye osnovaniya tyazhelyoy nef'ti mestorozhdeniya Van-Eganskoye [Nitrogen-containing bases of heavy oil of Van-Eganskoye field]. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2001, no. 4, pp. 33–35.
- Kuzmenko I.S., Min R.S. Zakonomernosti khromatograficheskogo razdeleniya serosoderzhashchikh soyedineniy s ispolzovaniyem khloridov metallov [Regularities of chromatographic separation of sulphur-containing compounds using metal chlorides]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry in interests of a sustainable development*, 1999, no. 7, pp. 169–173.
- Schmitter J.M., Arpino P.J. Azaarenes in Fuels. *Mass-Spectrometry Reviews*, 1985, no. 4, pp. 87–121.
- Bakel A.J., Philp R.P. Distribution and quantitation of organonitrogen compounds in crude oils and rock pyrolysates. *Org. Geochem.*, 1990, vol. 16, no. 1–3, pp. 353–367.
- Sergun V.P., Min R.S. Sernistyye soyedineniya v nef'tyakh yurskopaleozoyskogo kompleksa Zapadnoy Sibiri [Sulfur compounds in crude oils of the Jurassic-Paleozoic Play in Western Siberia]. *Petroleum Chemistry*, 2012, vol. 52, no. 2, pp. 86–91.
- Koveshnikov A.E. *Geologiya nef'ti i gaza* [Geology of oil and gas]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2010. 114 p.
- Nikitin E.E. *Nef'tyanoye tovarovedeniye* [Oil merchandizing]. St. Petersburg, SPbGIEU (Inzhekon) Press, 2008. 92 p.
- Kamyanov V.F. *Osnovy khimii nef'ti. Ch. I*. [Fundamentals of chemistry of oil. P. I]. Tomsk, TGU Press, 1981. 132 p.
- Turov Yu.P., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Beyko O.A. Gruppovoy sostav nizkomolekulyarnykh azotistykh osnovany samotlorskoy nef'ti [Group structure of low-molecular nitrogenous bases of samotlorsk oil]. *Petroleum Chemistry*, 1987, vol. 27, no. 1, pp. 39–44.
- Soliyenko O.V. Primeneniye IK-spektroskopii v issledovanii nef'tey i nef'teproduktov [Application of IR-spectroscopy in research of oils and oil products]. *Instrumental'nyye metody issledovaniya nef'ti* [Instrumental procedures of oil research]. Ed. by G.V. Ivanov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. pp. 18–41.
- Jewell D.M. The role of nonhydrocarbons in the analisis virgin and biodegraded petroleum. *Petroleum in the marine environment. Adv. in Chem.*, 1980, Ser. 185, pp. 219–232.

Received: 16 January 2015.

УДК 556.06:551.482.212

## ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МЕЖДУРЕЧЬЯ РЕК ГАМ И КАУ (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

**Савичев Олег Геннадьевич,**

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

**Нгуен Ван Луен,**

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Luyennv@yahoo.com

**Актуальность работы.** Исследования эколого-геохимического состояния водных объектов имеют как важное прикладное, так и фундаментальное научное значение, поскольку важнейшими задачами подобных исследований являются определение геохимического фона и отклонений от него, а также выявление природных и антропогенных факторов формирования как фоновых, так и аномальных концентраций. Особенно актуальны подобные исследования в Юго-Восточной Азии, включая северную часть Вьетнама, где в условиях высокой плотности населения важность обеспечения экономики водой необходимого качества и сохранения окружающей среды многократно возрастает.

**Цель работы:** оценка современного эколого-геохимического состояния поверхностных вод в уезде Чодонь провинции Баккан (СРВ) и его связи с гидрологическими и геоморфологическими условиями.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический, географо-гидрологический и статистические методы.

**Результаты и выводы.** Получены данные об эколого-геохимическом состоянии поверхностных вод в междуречье рек Гам и Кау (Северный Вьетнам, Провинция Баккан, уезд Чодонь). Эти воды в меженный период характеризуются как пресные с низким содержанием органических веществ и относительно повышенным содержанием ряда металлов (Zn, Pb, Fe, Al). Они повсеместно способны растворять первичные алюмосиликаты с образованием глинистых минералов и пересыщены относительно кварца. Пересыщение относительно карбонатных минералов характерно для водосбора реки Бан Тхи и верховий реки Дай. Установлено, что в водосборе реки Бан Тхи и в верховьях реки Дай речная сеть приурочена к тектоническим нарушениям, что способствует увеличению выноса Zn и Pb. Дополнительным фактором увеличения концентраций Zn и Pb является увеличение доли площади водосбора в верховьях рек без выраженной речной сети  $F/F_0$ . На основе полученных в феврале 2015 г. данных предположено, что характеристики сопряженности тектонических нарушений и речной сети и величины  $F/F_0$  являются критериями эффективных поисков рудопроявлений в регионе. Повышенные концентрации Zn, Pb, Fe, Al объясняются преимущественно влиянием природных факторов, что, безусловно, не исключает возможности загрязнения поверхностных вод в результате текущей и ранее осуществлявшейся хозяйственной деятельности.

### **Ключевые слова:**

Северный Вьетнам, речные воды, гидроморфологические и геологические факторы.

### **Введение**

Исследования эколого-геохимического состояния поверхностных и подземных вод имеют как важное прикладное, так и фундаментальное научное значение, поскольку важнейшими задачами подобных исследований являются определение геохимического фона и отклонений от него, а также выявление природных и антропогенных факторов формирования как фоновых, так и аномальных концентраций. Решение этих задач применительно к любому региону мира позволяет разработать долгосрочный прогноз изменения состояния экосистем речных водосборов, оптимизировать структуру природопользования и повысить эффективность природоохранных мероприятий и поисков полезных ископаемых. Соответствующие исследования особенно актуальны в Юго-Восточной Азии, где в условиях высокой плотности населения важность обеспечения экономики водой

необходимого качества и сохранения окружающей среды многократно возрастают.

С учётом этого авторами в 2015 г. начаты исследования эколого-геохимического состояния поверхностных и подземных вод на севере Социалистической республики Вьетнам (СРВ), на территории, административно соответствующей уезду Чодонь провинции Баккан, а географически – водосборам рек Красная и Тхайбинь, а именно – междуречью крупных притоков – рек Гам и Кау (рис. 1). На этой территории распространены рудопроявления Pb, Zn, Fe, Mn. Ранее разрабатывался ряд малых месторождений свинцово-цинковых руд, что привело к определённому ухудшению качества вод в ряде населённых пунктов и определило цель рассматриваемого этапа исследований – оценку современного эколого-геохимического состояния поверхностных вод в уезде Чодонь провинции Баккан (СРВ) и его связи с гидрологическими и геоморфологическими условиями.



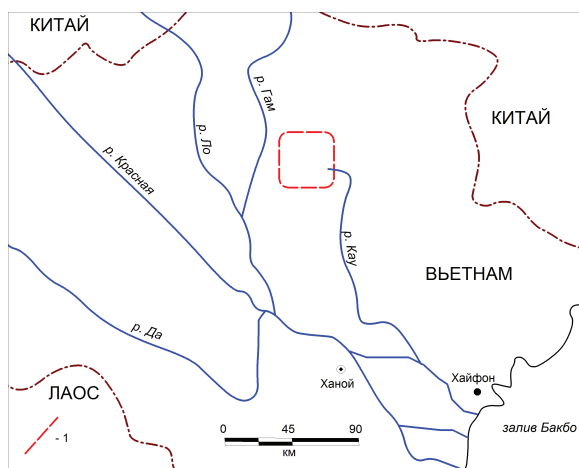


Рис. 1. Схема расположения района исследований (1) в междуречье рек Гам и Кау (притоки реки Красной)

Fig. 1. Research area (1) between the Gam and Kau rivers (tributaries of the Red river)

### Объект и методика исследования

Район исследований схематично показан на рис. 1, а расположение пунктов опробования – на рис. 2. В качестве основных объектов исследования выбраны: р. Кау (участок верхнего течения) – крупный приток системы реки Красной; р. Дай (приток реки Красной) и её приток Фо Дай; р. Та Диенг, впадающая в озеро Ба Бё; р. Бан Тхи (приток реки Гам) и её приток – река Ченгу.

Методика исследований включала в себя: 1) полевые работы по отбору проб речных вод; 2) лабораторные работы по определению химического состава проб воды; 3) расчёты насыщенности вод относительно ряда минералов и органоминеральных соединений, которые присутствуют или могут присутствовать в подстилающих отложениях; 4) расчёты гидрологических и гидроморфологических характеристик и статистический анализ взаимосвязей между ними и гидрохимическими показателями.

Отбор 10 проб речных вод (одновременно с измерением температуры воды, её удельной электропроводности УЭП и рН) проводился 14–16 февраля 2015 г. Нгуен Ван Луеном из слоя 0,3–0,5 м от поверхности в специально подготовленные ёмкости с учётом [1]. Лабораторные работы выполнялись в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (номер государственной аккредитации № РОСС RU. 0001.511901 от 12.07.2011 г.). В водных пробах проводилось определение: кондуктометрическим методом – значений удельной электропроводности (УЭП, здесь и далее в скобках – чувствительность 5 мкС/см); потенциометрическим – рН (0,1 ед.); титриметрическим –  $\text{Ca}^{2+}$  (1 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,04 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{HCO}_3^-$  (3 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{CO}_3^{2-}$  (3 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{CO}_2$  (4 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{Cl}^-$  (0,5 мг/дм<sup>3</sup>), перманганатной окисляемости ПО (0,25 мгО/дм<sup>3</sup>); турбидиметрическим –  $\text{SO}_4^{2-}$  (2 мг/дм<sup>3</sup>); фотоме-

трическим – Si (0,5 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{NH}_4^+$  (0,05 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{NO}_2^-$  (0,01 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{NO}_3^-$  (0,1 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{PO}_4^{3-}$  (0,01 мг/дм<sup>3</sup>), Fe (0,1 мг/дм<sup>3</sup>); инверсионно-вольтамперометрическим – Zn (0,5 мкг/дм<sup>3</sup>), Cd (0,2 мкг/дм<sup>3</sup>), Pb (0,2 мкг/дм<sup>3</sup>), Cu (0,6 мкг/дм<sup>3</sup>); атомно-абсорбционным – Al (20 мкг/дм<sup>3</sup>), ионной хроматографией –  $\text{Na}^+$  (0,1 мг/дм<sup>3</sup>),  $\text{K}^+$  (0,05 мг/дм<sup>3</sup>).

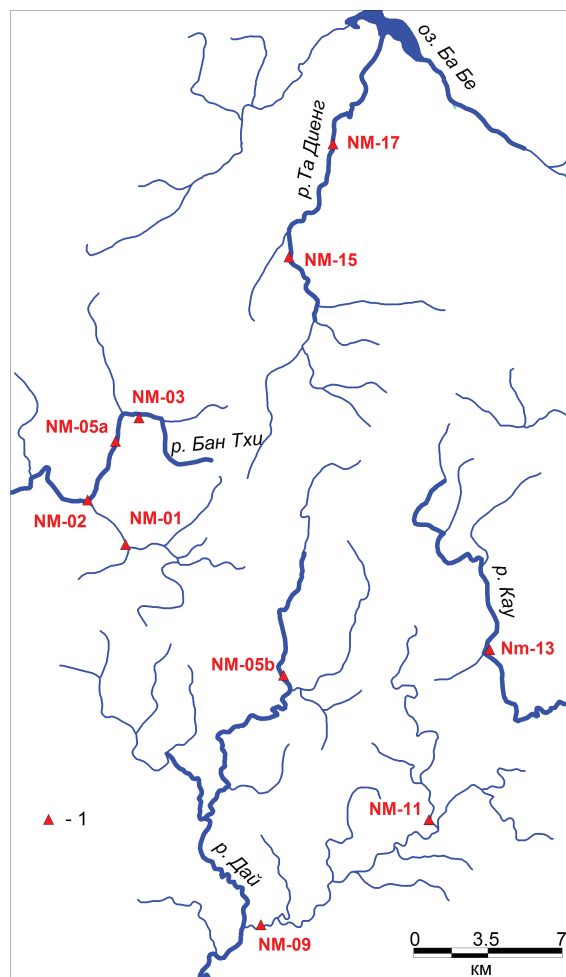


Рис. 2. Схема расположения пунктов отбора проб поверхностных вод уезде Чодонь провинции Баккан в феврале 2015 г.

Fig. 2. Sampling points in Cho Don district of Bac Can province in February 2015

Расчёт индекса насыщенности  $\eta$  проводился на основе методов химической термодинамики с помощью программного комплекса Solution+ [2]:

$$\eta = \lg \text{ПА} - \lg K_{\text{неq}}, \quad (1)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ;  $K_{\text{неq}}$  – константа неустойчивости. Отрицательные значения индекса  $\eta$  указывают на недосыщение, а положительные – на пересыщение раствора относительно минералов, взаимодействие с которыми рассматривается [3]. Концентрации фульво- (ФК) и гуминовых (ГК) кислот были определены по эмпирическим зависимостям, установленным для бассейна реки Обь (ФК=0,484ПО,

$R^2=0,63$ ;  $ГК=0,176ФК$ ,  $R^2=0,44$ ;  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения; с учётом [4, 5] зависимость считается удовлетворительной, если  $R^2>0,36$ ).

Гидрографические характеристики рек и их водосборов (длина водотока  $L$ , площадь водосбора  $F$ , средний уклон водотока  $J$ , густота речной сети  $P(r)$ ) определены согласно [6] по цифровой карте (в формате геoinформационной системы MapInfo) масштаба 1: 50 000. Кроме того, по цифровой геологической карте масштаба 1: 200 000 выполнен расчёт протяжённости тектонических нарушений и участков совпадений речных долин и тектонических нарушений. Максимальный водный сток дождевого паводка  $Q_{max}$  обеспеченностью  $p$  рассчитывался с использованием так называемого «рационального» метода или метода «предельной интенсивности» [7–9]:

$$Q_{max,p} = 16,7 I_{rf,p} \theta_{rf,p} k_{rf,0,1} k_{rf,0,2} k_{rf,0,3} F, \quad (2)$$

где  $I_{rf,p}$  – расчетная интенсивность осадков, соответствующая заданной обеспеченности для расхода воды, мм/мин;  $\theta_{rf,p}$  – коэффициент склонового стока;  $k_{rf,0,1}$  – коэффициент редукции максимального дождевого стока, определяемый в зависимости от площади водосборного бассейна  $F$ ;  $k_{rf,0,2}$  – коэффициент учета влияния уклона главного русла  $J$ ;  $k_{rf,0,3}$  – коэффициент, учитывающий форму водосборного бассейна. В качестве расчётной обеспеченности приняты 1 и 10 % (по опыту работ в умеренном поясе Северной Азии: 1 % – обеспеченность очень высокого расхода воды, при котором происходит затопление основной части поймы; 10 % – обеспеченность расхода воды, близкого по значению к «руслоформирующему» расходу воды). Дополнительно выполнен расчёт гидроморфологического показателя  $K_r$ , характеризующего влияние уклона реки  $J$ , ширины водосбора  $B_F$  и средней шероховатости его поверхности  $n_F$  на водный сток:

$$Q = \frac{B_F \sqrt{J}}{n_F} y^{\frac{5}{3}} = K_r y^{\frac{5}{3}}, \quad (3)$$

где  $y$  – слой водоотдачи водосбора [10].

Статистический анализ включал в себя проверку рядов на однородность согласно [6] по критериям Стьюдента, Уилкоксона (по среднему) и Фишера (по дисперсии) и корреляционный анализ. Статистически значимыми (с уровнем значимости 5 %) принимались коэффициенты корреляции  $r$  при условии:

$$|r| > 2 \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (4)$$

где  $N$  – объём выборки. В расчётах используется сумма главных ионов  $\Sigma_{mi}$  ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ материалов, полученных в феврале 2015 г. и соответствующих межгодовому периоду,

показал, что, во-первых, все изученные водные объекты относятся к категории «малых» рек с расходами воды до 41 м<sup>3</sup>/с (табл. 1). Во-вторых, изученные поверхностные воды по классификациям О.А. Алёкина [11] в целом пресные с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые первого, второго и третьего типов (табл. 2). По величине рН воды нейтральные и слабощелочные, по жёсткости – от очень мягких до умеренно жёстких, по величине перманганатной окисляемости – с очень малой окисляемостью, по содержанию органических и биогенных веществ – бета-мезосапробного класса [12, 13]. Превышение российских нормативов качества воды в объектах хозяйственно-питьевого назначения наблюдается также по содержанию веществ 1–2 класса опасности в 8 пробах из 10. Нарушение российских рыбохозяйственных нормативов в большинстве случаев отмечается по содержанию Cu, Pb, Al, Zn, Fe. Превышения вьетнамских нормативов качества вод [14] не отмечены, но, с учётом повышенных концентраций ряда токсичных микроэлементов, а также результатов сравнения с российскими нормативами, общее состояние изученных речных вод в феврале 2015 г. оценивается как неудовлетворительное с точки зрения обеспечения хозяйственно-питьевых нужд.

Поверхностные воды повсеместно способны растворять первичные алюмосиликаты с образованием глинистых минералов и пересыщены относительно кварца, что характерно для гидрогеохимических условий тропических областей [15, 16]. Пересыщение относительно карбонатных минералов характерно для водосбора реки Бан Тхи и верховий реки Дай. Кроме того, несмотря на низкое содержание органических веществ, вероятно пересыщение поверхностных вод относительно соединений металлов и гуминовых кислот (табл. 3). Таким образом, можно предположить, что рост концентраций ряда тяжёлых металлов в поверхностных водах района исследований ограничен малой растворимостью их соединений с карбонатами и гуминовыми кислотами.

Корреляционные связи между гидрохимическими, гидрологическими и гидроморфологическими показателями в целом относительно слабые (табл. 4), что в ряде случаев объясняется не отсутствием связей как таковых, а их нелинейностью. В целом можно отметить, что суммарное содержание растворённых солей, концентраций Zn и Pb возрастает с: а) увеличением уклонов водотоков и гидроморфологического показателя  $K_r$  (табл. 3, рис. 3); б) уменьшением их длины и доли водосбора с речной сетью (табл. 3, рис. 4). В последнем случае физический смысл зависимости может быть выражен уравнением:

$$C = C_0 \frac{Y_0}{Y} \left( \frac{F_0}{F} \right)^b, \quad (5)$$

где  $C$  и  $Y$  – концентрация вещества и слой водного стока исследуемой реки;  $C_0$  и  $Y_0$  – концентрация

**Таблица 1.** Морфометрические, геологические и гидрологические характеристики исследуемых водотоков в междуречье рек Гам и Кау

**Table 1.** Morphometric, geologic and hydrologic characteristics of the researched water-currents between the Gam and Kau rivers

Показатель Index	Единицы измерения Units	Пункт отбора проб воды (номер на рис. 2)/Water sampling point (Fig. 2)									
		NM-01	NM-02	NM-05a	NM-03	NM-05b	NM-09	NM-11	NM-13	NM-15	NM-17
		Река – пункт /River – point									
		Ченгу у п. Йен Тхюонг the Che Ngu river river – Yen Thuong	Банк Кау (Бан Тхи) у п. Йен Тхинг the Ban Cau (Ban Thi) river – Yen Thinh	Бан Тхи у п. Бан Тхи the Ban Thi river	Бан Тхи the Ban Thi river	Дай the Day river	Фо Дай у п. Трунг the Pho Day river	Фо Дай у п. Йен Ми the Pho Day river – Yen My	Кау у п. Донг Виен the Cau river – Dong Vien	Та Диенг у п. На Анх the Ta Dieng river – Na Anh	Та Диенг у п. На Хим the Pho Day river – Na Him
Возраст подстилающих пород Basement age	–	D <sub>1</sub>					O <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>		O <sub>2</sub> -S <sub>1</sub> , T <sub>3</sub> , D <sub>1-2</sub>	Долина/valley – aQ; Водосбор/Watershed – T <sub>3</sub> , D <sub>1-2</sub> , D <sub>1</sub>	
F	км <sup>2</sup> (km <sup>2</sup> )	43	119	54	23	45	129	33	78	105	134
F <sub>0</sub>		7	27	20	2	7	10	4	15	12	13
L	км/km	6,5	10,6	7,9	5,6	13,8	26,5	13,3	15,0	12,7	19,3
J	м/км (m/km)	36,00	45,66	48,99	60,71	41,23	11,47	17,97	32,80	36,46	25,18
Q <sub>max</sub> (1 %)	м <sup>3</sup> /с (m <sup>3</sup> /s)	20,1	39,9	23,6	13,4	20,8	40,7	16,6	29,9	36,5	42,6
Q <sub>max</sub> (10 %)		7,5	14,9	8,8	5,0	7,7	15,2	6,2	11,1	13,6	15,9
M <sub>max</sub> (10 %)	л/(с·км <sup>2</sup> ) l/(s·km <sup>2</sup> )	174,00	124,91	162,55	216,71	171,96	117,63	186,79	142,56	129,52	118,38
K <sub>r</sub>	–	8,14	15,56	9,81	6,56	4,54	3,58	2,28	6,18	11,09	7,74
P(r)	км/км <sup>2</sup> km/km <sup>2</sup>	0,52	0,40	0,34	0,44	0,31	0,50	0,52	0,33	0,29	0,31
P(f)		0,19	0,16	0,20	0,21	0,26	0,20	0,02	0,17	0,36	0,35
P(rf)		0,08	0,11	0,18	0,15	0,19	0,09	0,00	0,09	0,11	0,11
P(f)P(r)		0,10	0,06	0,07	0,09	0,08	0,10	0,01	0,06	0,10	0,11

Примечание: F – площадь водосбора; F<sub>0</sub> – площадь верхней части водосбора без выраженной речной сети; L – длина водотока от истока; J – средний уклон водотока; Q<sub>max</sub> (1 %), Q<sub>max</sub> (10 %) – максимальные расходы воды обеспеченностью 1 и 10 % (по формуле 2); M<sub>max</sub> (10 %) – максимальный модуль водного стока обеспеченностью 10 %; K<sub>r</sub> – гидроморфологический показатель, определяемый по формуле (3); P(r) – густота речной сети; P(f) – отношение суммарной длины тектонических нарушений в пределах водосбора к его площади; P(rf) – отношение суммарной длины совпадающих речной сети и тектонических нарушений в пределах водосбора к его площади (по формуле 6).

Note: F is the basin area; F<sub>0</sub> is the area of the top part of a river basin without the expressed river network; L is the length of the river from a source; J is an average river slope; Q<sub>max</sub> (1 %), Q<sub>max</sub> (10 %) are the maximal charges with probability 1 and 10 % (formula 2); M<sub>max</sub> (10 %) is the maximal module of a water runoff with probability 10 %; K<sub>r</sub> is the hydromorphologic parameter (formula 3); P(r) is the density of the river network; P(f) is the relation of total length of tectonic faults within the limits of a basin to its area; P(rf) is the relation of total length conterminous river network and tectonic faults within the limits of a basin to its area (formula 6).

вещества и слой водного стока в верховьях реки без выраженной речной сети; b – коэффициент, отражающий комплекс гидрогеохимических и геоморфологических условий водосбора [17].

Исключительно интересной представляется выявленная зависимость концентраций Pb и Zn от сопряженности речной сети и тектонических нарушений в пределах водосборов. Очевидно, что в ряде случаев повышенные концентрации химических элементов могут быть связаны с разгрузкой подземных вод, приуроченных к зонам разломов, идентифицируемых по ряду признаков, проявляющихся в том числе в формах и геофизических характеристиках рельефа [18–20]. Нами сделано предположение, что соответствующие участки могут быть выявлены следующим образом.

Допустим, что густота речной сети может рассматриваться как вероятность направленного (руслового) движения поверхностных вод по водосбору P(r). Аналогично рассматривается и плотность распространения тектонических нарушений в пределах водосбора P(f). Тогда вероятность их совместного проявления P(rf) в случае независимости друг от друга оценивается как произведение P(r) и P(f), а в случае зависимых величин – по формуле (6):

$$P(rf) = P(r)P(f) = P(f|r)P(r). \quad (6)$$

Тогда разность P(rf) – P(r)P(f) может рассматриваться как характеристика взаимосвязанности геологических, геоморфологических и гидрологических процессов. Например, в рассматриваемом случае в целом по территории уезда Чодонь величины P(rf) и P(r)P(f) статистически неразличимы

**Таблица 2.** Химический состав поверхностных вод в уезде Чодонь провинции Баккан в феврале 2015 г.**Table 2.** Chemical composition of surface waters in Cho Don district of Bac Can province in February, 2015

Показатель Index	Единицы измерения Units	Номер пробы (на рис. 2) / Sample number (Fig. 2)										Среднее Average
		NM-01	NM-02	NM-05a	NM-03	NM-05b	NM-09	NM-11	NM-13	NM-15	NM-17	
Дата отбора Sampling date	–	14.02				15.02	16.02	15.02	16.02			–
pH	ед. pH	8,03	8,00	8,00	7,70	7,75	7,40	7,45	7,50	7,50	7,80	7,71
CO <sub>2</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	3,50	5,30	6,20	5,30	5,30	7,00	3,50	7,00	5,30	5,30	5,37
УЭП	мКС/см	306	330	340	350	316	114	103	92	198	218	237
Σ <sub>mi</sub>		291,7	325,9	319,5	335,5	283,4	92,6	87,7	73,9	178,2	189,4	217,8
Ca <sup>2+</sup>		61,6	72,3	71,7	74,2	58,0	12,3	11,7	11,0	36,4	39,0	44,8
Mg <sup>2+</sup>		6,5	5,5	5,4	5,8	7,3	4,4	3,6	2,2	3,8	3,9	4,8
Na <sup>+</sup>		1,4	1,2	1,2	1,3	3,5	4,1	4,1	3,8	2,7	2,4	2,6
K <sup>+</sup>		1,1	0,7	0,6	0,9	1,8	2,6	2,7	2,2	1,4	1,3	1,5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		213,0	232,0	227,0	238,0	185,0	63,0	61,0	49,0	124,0	134,0	152,6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		6,3	12,6	12,1	13,4	26,2	4,2	3,2	3,9	8,6	7,6	9,8
Cl <sup>-</sup>		1,8	1,6	1,5	1,9	1,6	2,0	1,4	1,8	1,3	1,2	1,6
Si		4,93	4,58	4,18	4,33	7,01	11,29	10,42	8,91	7,44	6,58	6,97
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		0,140	0,170	0,150	0,210	0,120	0,180	0,120	0,150	0,190	0,150	0,158
NO <sub>2</sub>		0,010	0,033	0,028	0,044	0,010	0,031	0,041	0,044	0,027	0,053	0,032
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		2,380	3,410	4,340	3,780	2,500	1,460	0,960	2,280	2,120	2,260	2,549
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,080	0,065	0,076	0,025	0,025	0,040
Fe		0,170	0,130	0,100	0,130	0,120	0,230	0,480	0,250	0,190	0,150	0,195
Zn		8,60	51,00	80,00	140,00	58,00	8,50	6,70	6,80	29,00	8,30	39,69
Cd		0,02	0,09	0,15	0,44	0,13	0,30	0,20	0,02	0,03	0,03	0,14
Pb		1,30	7,30	11,00	18,00	4,60	0,53	0,98	1,50	1,30	1,50	4,80
Cu		2,10	1,10	2,20	2,00	1,80	1,10	2,00	1,70	1,90	2,20	1,81
Al		155	253	143	40	142	70	328	464	141	172	191
ПО	мгО/дм <sup>3</sup>	0,58	0,36	0,28	0,46	0,40	1,00	0,82	1,02	0,56	0,58	0,61

**Таблица 3.** Индекс насыщения поверхностных вод в уезде Чодонь провинции Баккан в феврале 2015 г. (по формуле 1)**Table 3.** Index of saturation of surface waters in Cho Don district of Bac Can province in February, 2015 (formula 1)

Формула/Formula	Номер пробы (на рис. 2) / Sample number (Fig. 2)									
	NM-01	NM-02	NM-05a	NM-03	NM-05b	NM-09	NM-11	NM-13	NM-15	NM-17
CaCO <sub>3</sub> (кальцит) = Ca <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,00	0,07	0,07	-0,22	-0,38	-9,19	-2,59	-9,22	-1,13	-0,64
CaCO <sub>3</sub> (кальцит) + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = Ca <sup>2+</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,43	0,38	0,30	0,42	0,10	-1,53	-1,27	-1,78	-0,39	-0,29
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (доломит) = Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + 2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,06	0,06	0,04	-0,51	-0,63	-17,80	-4,66	-18,12	-2,20	-1,25
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (доломит) + 2CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O = = Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + 4HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,92	0,68	0,50	0,78	0,34	-2,48	-2,03	-3,23	-0,73	-0,56
Ca (ГК) = Ca <sup>2+</sup> + ГК	1,01	1,07	1,07	1,08	0,98	0,36	0,35	0,33	0,81	0,84
Mg (ГК) = Mg <sup>2+</sup> + ГК	0,76	0,68	0,67	0,70	0,81	0,64	0,56	0,35	0,55	0,56
SiO <sub>2</sub> (кварц) + 2H <sub>2</sub> O = H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	0,30	0,27	0,23	0,25	0,46	0,67	0,64	0,57	0,49	0,43
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (анортит) + 3H <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub> = = Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·2H <sub>2</sub> O(каолинит) + Ca <sup>2+</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-256,27	-256,50	-256,66	-256,46	-256,78	-258,54	-257,98	-258,79	-257,28	-257,18
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (альбит) + 7H <sub>2</sub> O + H <sup>+</sup> = = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O(гибсит) + Na <sup>+</sup> + 3H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	-204,39	-204,58	-204,70	-204,90	-203,79	-203,43	-203,49	-203,67	-204,07	-203,99
2NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (альбит) + 11H <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub> = = Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·2H <sub>2</sub> O(каолинит) + 2Na <sup>+</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + + 4H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	-11,06	-11,61	-11,92	-11,59	-10,11	-10,25	-9,82	-10,94	-10,53	-10,80
ZnSO <sub>4</sub> (цинксит) = Zn <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-16,37	-15,25	-15,07	-13,91	-14,48	-15,69	-15,94	-15,87	-14,95	-15,89
ZnCO <sub>3</sub> (смитсонит) = Zn <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-2,96	-2,13	-1,94	-1,11	-2,05	-10,70	-4,22	-10,86	-2,64	-3,07

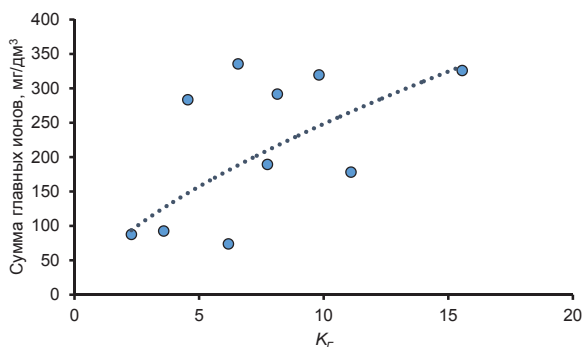
(по результатам проверки при уровне значимости 5 %: фактическое и критическое значения критерия Стьюдента – 1,60 и 2,10 соответственно; фактическое и критические значения Уилкоксона – 74 и 16...84; фактическое и критическое значения

критерия Фишера – 3,34 и 4,03). Однако наиболее высокие концентрации Zn и Pb обнаружены в водах реки Бан Тхи и верховий реки Дай, приуроченных к тектоническим нарушениям и отложениям нижнего девона (рис. 5).

**Таблица 4.** Статистически значимые коэффициенты корреляции между гидрохимическими, гидрологическими и гидроморфологическими показателями (при уровне значимости 5 % и выполнении условия (4))

**Table 4.** Statistically significant factors of correlation between hydrochemical, hydrological and hydromorphological parameters (at significance point 5 % and fulfillment of (4))

Показатель Index	F	L	J	K <sub>r</sub>	Q <sub>max</sub> (1%)	Q <sub>max</sub> (10%)	M <sub>max</sub> (10%)
pH	-	-0,60	0,57	0,61	-	-	-
УЭП	-	-0,69	0,83	0,52	-	-	-
Σ <sub>ми</sub>	-	-0,71	0,84	0,55	-	-	-
Ca <sup>2+</sup>	-	-0,72	0,85	0,59	-	-	-
Mg <sup>2+</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Na <sup>+</sup>	-	0,72	-0,76	-0,72	-	-	-
K <sup>+</sup>	-	0,68	-0,80	-0,78	-	-	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-0,73	0,83	0,57	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-	0,58	-	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	-	-	-	-	-	-	-
Si	-	0,78	-0,86	-0,67	-	-	-
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	-	-	-	-	-	-
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-	-	-	-	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-0,63	0,89	0,59	-	-	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-	0,62	-0,69	-0,60	-	-	-
F <sup>-</sup>	-	0,54	-0,68	-0,56	-	-	-
Fe	-	-	-0,65	-0,56	-	-	-
Zn	-	-0,58	0,86	-	-0,50	-0,50	0,66
Cd	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-0,61	0,85	-	-	-	0,67
Cu	-0,51	-	-	-	-0,65	-0,65	0,55
Al	-	-	-	-	-	-	-
ПО	-	0,64	-0,75	-0,59	-	-	-

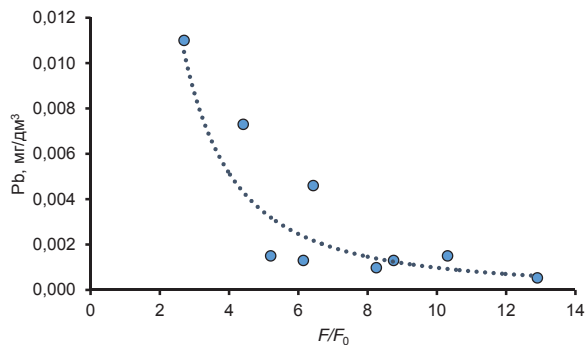


**Рис. 3.** Зависимость суммы главных ионов Σ<sub>ми</sub> от гидроморфологического показателя K<sub>r</sub> (Σ<sub>ми</sub>=54,421K<sub>r</sub><sup>0,659</sup>; R<sup>2</sup>=0,39)

**Fig. 3.** Dependence of the sum of main ions Σ<sub>mi</sub> on the hydromorphological parameter K<sub>r</sub> (Σ<sub>mi</sub>=54,421K<sub>r</sub><sup>0,659</sup>; R<sup>2</sup>=0,39)

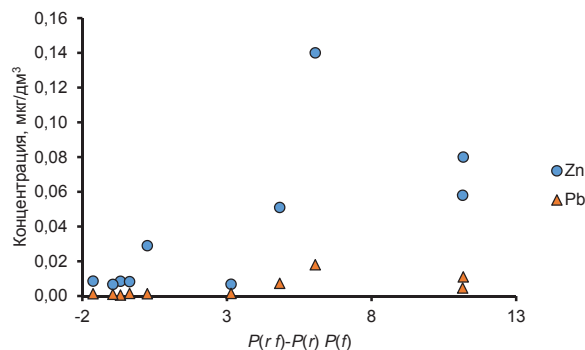
**Выводы**

Поверхностные воды в междуречье рек Гам и Кау характеризуются как пресные с низким содержанием органических веществ и относительно повышенным содержанием ряда металлов (Zn, Pb, Fe, Al).



**Рис. 4.** Зависимость концентраций Pb от соотношения суммарной площади водосбора F и площади верховий без речной сети F<sub>0</sub> (Pb=0,064(F/F<sub>0</sub>)<sup>-1,813</sup>; R<sup>2</sup>=0,73; общий вид зависимости (5) без учёта пробы NM-03 с повышенным содержанием Pb

**Fig. 4.** Dependence of Pb concentration on the ratio of the total area of the river basin F and the area of the basin upstream without river network F<sub>0</sub> (Pb=0,064F/F<sub>0</sub>)<sup>-1,813</sup>; R<sup>2</sup>=0,73); general view of the dependence (5) without sample NM-03 with increased content of Pb



**Рис. 5.** Зависимости концентраций Zn и Pb от разницы вероятности пересечения тектонических нарушений P(rf) и произведения величин P(r) и P(f) (Zn=0,0062(P(rf)-P(r)P(f))+0,0193; R<sup>2</sup>=0,47; Pb=0,0008(P(rf)-P(r)P(f))+0,0023; R<sup>2</sup>=0,41)

**Fig. 5.** Dependences of Zn and Pb concentration on a difference of probability of crossing tectonic faults P(rf) and the products of values P(r) and P(f) (Zn=0,0062(P(rf)-P(r)P(f))+0,0193; R<sup>2</sup>=0,47; Pb=0,0008(P(rf)-P(r)P(f))+0,0023; R<sup>2</sup>=0,41)

Геологическое строение исследуемого района характеризуется наличием гранитно-метаморфогенного фундамента, состоящего из переработанных выступов континентальной коры и перекрытого палеозойско-раннемезозойскими геосинклинально-складчатými образованиями [21]. В водосборе реки Бан Тхи и в верховьях реки Дай речная сеть приурочена к тектоническим нарушениям, что способствует увеличению выноса Zn и Pb, рудопроявления которых выявлены на указанных участках. Дополнительным фактором увеличения концентраций Zn и Pb является увеличение доли площади водосбора в верховьях рек без выраженной речной сети (F/F<sub>0</sub>). На основе полученных в феврале 2015 г. данных можно предположить, что использование характеристик сопряжённости тектонических нарушений и речной сети и величины

$F/F_0$  являются критериями эффективных поисков рудопроявлений в регионе.

С учётом этого повышенные концентрации Zn, Pb, Fe, Al объясняются преимущественно влияни-

ем природных факторов, что, безусловно, не исключает возможности загрязнения поверхностных вод в результате текущей и ранее осуществлявшейся хозяйственной деятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вода. Общие требования к отбору проб. ГОСТ Р 51592–2000. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 34 с.
2. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
3. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions // Modelling in aquatic chemistry / ed. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris: Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
4. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – V. 3. – № 10. – P. 282–290.
5. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
6. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик / под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
7. Пособие к СНиП 2.05.03–84 по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). – М.: ГУПнКС, 1992. – 374 с.
8. Бузин В.А. Опасные гидрологические явления. – СПб.: РГГМУ, 2008. – 228 с.
9. Mujumdar P.P., Kumar D.N. Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modeling. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
10. Савичев О.Г., Паромов В.В. Метод определения характерных расходов воды рек гумидных областей Западной Сибири при отсутствии данных наблюдений // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (14). – С. 3157–3160.
11. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
12. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. ГОСТ 17.1.2.04.-77. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 17 с.
13. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
14. Государственная техническая норма качества воды (QCVN 38:2011/ ВТНМТ). – Ханой: Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2011. – 6 с. / на вьетнам. яз.
15. Фридлянд В.М. Почвы и коры выветривания влажных тропиков (на примере Северного Вьетнама). – М.: Наука, 1964. – 312 с.
16. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
17. Савичев О.Г., Домаренко В.А. Закономерности изменения химического состава речных отложений и их использование в поисках полезных ископаемых // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (3). – С. 520–525.
18. Корчуганова Н.И. Аэрокосмические методы в геологии. – М.: Геокарт, 2006. – 244 с.
19. Дистанционные методы геологических исследований, прогноза и поиска полезных ископаемых (на примере Рудного Алтая) / А.А. Поцелуев, Ю.С. Ананьев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов – Томск: STT, 2007. – 228 с.
20. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2008. – 288 с.
21. Дао Мань Тиен. Методология и особенности геохимической специализации гранитоидных формаций Северного Вьетнама: дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Баку, 1984. – 198 с.

Поступила 08.05.2015 г.

UDC 556.06:551.482.212

## HYDROECOLOGICAL CONDITION BETWEEN THE GAM AND KAU RIVERS (NORTHERN VIETNAM)

Oleg G. Savichev,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

Nguyen Van Luen,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Luyennv@yahoo.com

**Relevance.** Researches of a ecology-geochemical condition of water objects have both important applied, and fundamental scientific value as the major problems of similar researches are definition of a geochemical background and deviations from it, and also revealing of natural and anthropogenous factors of formation both background, and abnormal concentration. Similar researches in Southeast Asia, including northern part of Vietnam, are especially actual. There, in conditions of high population density, the importance of maintenance of economy with water of necessary quality and preservation of environment grows repeatedly.

**The aim of the research** is to estimate the modern ecology-geochemical condition of surface waters in district Cho Don of province Bac Can (Vietnam) and its connection with hydrological and geomorphological conditions.

**Methods of the research:** landscape-geochemical, geography-hydrological and statistical methods.

**Results and conclusions.** The authors have obtained the data on ecology-geochemical state of surface waters in the area between the Gam and Kau rivers (Northern Vietnam, province Bac Can, district Cho Don). These waters in low flow period are characterized as fresh with the low contents of organic substances and relatively increased contents of some metals (Zn, Pb, Fe, Al). They are everywhere capable to dissolve primary aluminosilicates with formation of clay minerals and they are oversaturated with quartz. The oversaturation with carbonate minerals is typical for a basin of the Ban Thi river and upper of the Day river. It is established that in a basin of the Ban Thi river and in upstream of the Day river the river network is dated to tectonic faults that promotes the increase of Zn and Pb runoff. The increase in a share of the basin area in the upstream of the rivers without the expressed river network  $F/F_0$  is the additional factor of increase in concentration of Zn and Pb. On the basis of the data received in February 2015 it is assumed that characteristics of tectonic faults interlinking with the river network and the value  $F/F_0$  are the criteria of effective searches of geochemical anomalies in the region. The increased concentrations of Zn, Pb, Fe, Al are mainly explained by the influence of natural factors. This does not certainly exclude an opportunity of polluting superficial waters as a result of current economic activities and the one carried out before.

**Key words:**

Northern Vietnam, river waters, hydromorphological and geological factors.

**REFERENCES**

1. *Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. GOST R 51592-2000* [Water. General requirements for sampling]. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2000. 34 p.
2. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
3. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions. *Modelling in aquatic chemistry*. Ed. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, Nuclear energy agency, 1997. pp. 35–68.
4. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 3, no. 10, pp. 282–290.
5. Kritskij S.N., Menkel M.F. Hidrologicheskie osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami [Hydrological bases of management of water-economic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 271 p.
6. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [The manual by definition of hydrological characteristics]. Eds. A.V. Rozhdvestvensky, A.G. Lobanova. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
7. *Posobie k SNiP 2.05.03-84 po izyskaniyam i proektirovaniyu zheleznodorozhnykh i avtodorozhnykh mostov (PMP-91)* [The manual to Russian Building norms 2.05.03-84 on research and design of railway and road bridge transitions through water-currents]. Moscow, GUPiKS Press, 1992. 374 p.
8. Buzin V.A. *Opasnye gidrologicheskie yavleniya* [Dangerous hydrological phenomena]. St. Petersburg, RSHU Press, 2008. 228 p.
9. Mujumdar P.P., Kumar D.N. *Floods in a Changing Climate. Hydrologic Modeling*. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
10. Savichev O.G., Paromov V.V. Metod opredeleniya kharakternykh raskhodov vody rek gumidnykh oblastey Zapadnoy Sibiri pri otсутstviy dannykh nablyudeniya [Method of estimating characteristics of river runoff flow without the supervision data]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2013, no. 10 (14), pp. 3157–3160.
11. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
12. *Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii rybokhozyaystvennykh vodnykh obektov. GOST 17.1.2.04-77* [Parameters of conditions and rule of valuation of fish water objects. GOST 17.1.2.04-77]. Moscow, Gosstandard Publ., 1977. 17 p.
13. *Gidrokhemicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical parameters of the environmental conditions]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM, INFRA-M Publ., 2007. 192 p.
14. *Gosudarstvennaya tekhnicheskaya norma kachestva vody* [The state technical norm of water quality] (QCVN 38:2011/ BTNMT). Khanoi, Ministry of Natural Resources and Environment Protection, 2011. 6 p. / in Vietnam.
15. Fridland V.M. *Pochvy i kory vyvetrivaniya vlazhnykh tropikov (na primere Severnogo Vietnama)* [Ground of humidic tropics (by the example of Northern Vietnam)]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 312 p.
16. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
17. Savichev O.G., Domarenko V.A. Zakonomernosti izmeneniya khimicheskogo sostava rechnykh otlozheniy i ikh ispolzovanie v poiskakh poleznykh iskopaemykh [Laws of change of the chemical composition of river sediments and their use in searching minerals]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 6 (3), pp. 520–525.
18. Korchuganova N.I. *Aerokosmicheskie metody v geologii* [Remote methods in geology]. Moscow, Geokart Publ., 2006. 244 p.
19. Potseluev A.A., Ananiev Yu.S., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. *Dstantsionnye metody geologicheskikh issledovaniy, prognoza i poiska poleznykh iskopaemykh (na primere Rudnogo Altaya)* [Remote methods of geological research, forecast and searches of minerals (by examples of Altay)]. Tomsk, STT Publ., 2007. 228 p.
20. Maloletko A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoy Sibiri v mezozoe i kaynozoe* [Evolution of river systems of Western Siberia in Cenozoic and Mesozoic]. Tomsk, TSU Press, 2008. 288 p.
21. Dao Man Tien. *Metodologiya i osobennosti geokhemicheskoy spetsializatsii granitoidnykh formatsiy Severnogo Vietnama. Dis. Kand. nauk* [Methodology and features of geochemical specialization of granite formations of Northern Vietnam. Cand. Sc. Diss.]. Baku, 1984. 198 p.

Received: 08 May 2015.

УДК 551.263.94

## ПРОМЫШЛЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕЙ

Иванов Владимир Петрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ivp2005@mail.ru

Многообразие углей по происхождению, свойствам и качеству вызывает потребность их унификации, поэтому создаются различные классификации углей: по вещественному составу, строению, генезису, потреблению и так далее. Наибольшая потребность классифицирования углей связана с разделением их по группам для рационального использования в промышленности и в энергетике.

**Цель работы:** разработка промышленно-энергетической классификации на основе предлагаемых показателей ценности: генетическое преимущество, коксующая и коксообразующая способности, и стандартизованных параметров: зольность, выход летучих веществ, толщина пластического слоя, теплота сгорания, используемых для определения качества углей, для оценки рационального использования углей.

**Методы исследования:** область применения ГОСТ 25543–2013 марочная классификация углей по генетическим и технологическим параметрам и определение по марке направление их использования. Критический анализ марочной классификации с помощью новых показателей:  $K^m$  (генетическое преимущество углей между собой),  $K^{cc}$  (коксующая способность) и  $K^{mk}$  (коксобразующая способность), показал невозможность выделения среди спекающихся углей коксующихся углей по спекаемости (толщине пластического слоя) и выходу летучих веществ; оценка энергетической способности позволяет обосновано выделять энергетические угли среди каменных углей и антрацитов.

**Результаты.** Предлагаемая промышленно-энергетическая классификация направлена на совершенствование классификации ископаемых углей в недрах и предназначена для выделения среди спекающихся углей коксующиеся угли, а среди последних – коксообразующиеся угли, а среди неспекающихся углей – энергогенерирующие и топливные. Предложено разделять гумусовые угли на технологические, энерготехнологические и топливные угли по основным направлениям использования их глубокой переработки, а в качестве критерия ценности выбраны показатели промышленно-генетической, технологической и энергетической ценности. Предложенная классификация рассматривается дополнением ГОСТ 25543–2013 в части разделения углей по направлениям использования.

### Ключевые слова:

Уголь, унификация, марка угля, промышленно-генетическая классификация, направление использования углей, критерий ценности, промышленно-энергетическая классификация.

Потребность в унификации углей – это постоянный поиск их оптимизации для различных целей, например при создании классификаций: угольных пластов по самовозгоранию углей, углей по содержанию неорганических веществ в угольном веществе или по его структуры [1–3].

Всё же основной поиск критериев унификации углей, как за рубежом [4–7], так в нашей стране [8–11], ведётся для создания промышленно-генетических [8, 12, 13] и потребительских [9, 10, 14, 15] классификаций. Для этого используются разные методы оценки [6, 13, 15–18], а критериями унификации углей выступают ранг, марка, ценность.

Актуальность выбранной темы – поиск критериев унификации углей разного происхождения, продиктована общей задачей угольного сообщества в создании единой международной классификации углей для оценки экономической значимости запасов/ресурсов, т. е. ценности. По мнению авторов [19] существующая классификация углей по генетическим и технологическим параметрам плохо сопоставляется с другими национальными и международными классификациями, несмотря на это ГОСТ 25543–2013 [12] действует не только в России, но распространяется на угли стран ЕАЭС и СНГ.

Классификация углей (ГОСТ 25543–2013) проводится по генетическим ( $R_0$ ,  $\Sigma OK$ ) и технологическим (для бурых –  $W_{\max}^{af}$  и  $T_{sk}^{daf}$ ; каменных –  $V^{daf}$  и  $u$ ; антрацитов –  $V_v^{daf}$  и  $A_R$ ) параметрам. По сути, данный стандарт предусматривает промышленно-генетическую классификацию углей по генетическим признакам и основным энергетическим и технологическим характеристикам и объединение близких по свойствам углей в марки, которая является критерием разновидности углей [20]. Именно на этом основании стандарт предусматривает по угольной марке разделять угли на технологическое и энергетическое направления использования.

Критерий ценность углей, альтернативный марочному критерию, направлен на разделение углей по потребительским свойствам при их использовании в промышленности и энергетике [21], но определение ценности углей для коксования всегда является приоритетным [22–25].

Несовершенство ГОСТ 25543–2013 как раз состоит в том, что его создатели объединили промышленно-генетическую и потребительскую классификации, используя только марку угля, без оценки потребительских свойств углей. Созданная на основе данного стандарта классификация для на-



логообложения за пользование ресурсами показала ошибочность такого подхода [26].

Создатели промышленно-генетической классификации [8], на которую опирается ГОСТ 25543–2013, отмечали, что марочное деление углей удобно для систематизации многообразия гумусовых углей, но для определения их рационального использования необходимо проводить полупромышленные или лабораторные коксования для выделения коксующихся углей. Однако создатели данного стандарта [11] посчитали, что по марке можно разделить угли по направлениям использования, тем самым невольно сделали её критерием ценности углей. На практике это обернулось обоснованным отнесением спекающихся углей к коксующимся углям и искажению их запасов в государственном балансе.

Рассмотрим детально данный недочёт ГОСТ 25543–2013 применительно к каменным углям с позиции предлагаемых критериев ценности углей. Считается, что по спекающейся способности ( $y$ ) и выходу летучих веществ ( $V^{daf}$ ) можно выделять коксующиеся угли, т. е. угли, способные коксоваться. В работах [17, 18, 27] опровергается данная точка зрения и предлагается методология выделения среди спекающихся углей коксующихся углей, а среди последних – коксообразующих углей, по коксующей ( $K^{KC}$ ) и коксообразующей ( $K^{ПТК}$ ) способностям, а в работе [17] предложен новый подход разделения углей по их генетическому преимуществу ( $K^{ПТ}$ ) между собой. Раскроем через определения понятийную суть предлагаемых терминов.

Генетическое преимущество – это свойство ископаемого угля, обуславливающее такое сочетание содержания гелифицированных компонентов и степени метаморфизации в процессе его формирования, которое обеспечивает ему высокую степень применимости в промышленности и энергетике среди других углей. Определяется путём расчёта величин: показателя отражения витринита ( $R_0$ ) и содержания мацералов ( $Vt, Sv, I, L, M$ ), через них же рассчитывается стандартизованный параметр  $\Sigma OK$  для маркировки углей.

Коксующая способность – это свойство измельчённого ископаемого угля обеспечивать установленную когезионную прочность и выход полукокса при спекании. Определяется, как и показатель спекающейся способности ( $y$ ), по ГОСТ 1186–87, но для расчёта величины  $K^{KC}$  дополнительно анализируется выход летучих веществ угля и пластометрического полукокса.

Коксообразующая способность – это свойство измельчённого ископаемого угля, обеспечивать при спекании образование полукокса с заданной прочностью его тела. Определяется путём испытание структурной прочности тела пластометрического полукокса по ГОСТ 9521–74 «Метод определения коксуетности» в углях и угольных смесях.

Таким образом, данные показатели:  $K^{KC}$ ,  $K^{ПТК}$ ,  $K^{ПТ}$ , отражают потребительские свойства, в частности для производства кокса технологией слоевого коксования, в которой коксующие свойства углей являются главными при выборе углей для угольной шихты. При получении данных показателей используются методы и параметры, что и для маркировки, но привлечение других методов расширяет их информативность. Они одновременно учитывают генетические особенности образования угольного вещества, способность угля спекаться и коксоваться, а также коксообразующую способность угля в виде когезионных свойств и выхода кокса с определённой прочностью его тела.

Опираясь на базу данных качества углей ( $R_0, Vt, Sv, I, L, M, \Sigma OK, y, V^{daf}$ ), создателями стандарта [11] на примере Донецкого, Карагандинского, Кузнецкого и Печорского бассейнов был сделан сравнительный анализ показателей  $y$  и  $K^{KC}$  в каменноугольно-пермских углях (рис. 1). Из рисунка видно, что тренды показателей способности углей: спекающейся и коксующей, в ряду их метаморфизма имеют разный характер изменения.

Характер изменения показателей коксующей ( $K^{KC}$ ) и коксообразующей ( $K^{ПТК}$ ) способностей в углях с разной спекаемостью ( $y$ ) по маркам, расположенных с учётом их метаморфизма, в виде полинома (рис. 2). При этом коэффициент детермина-

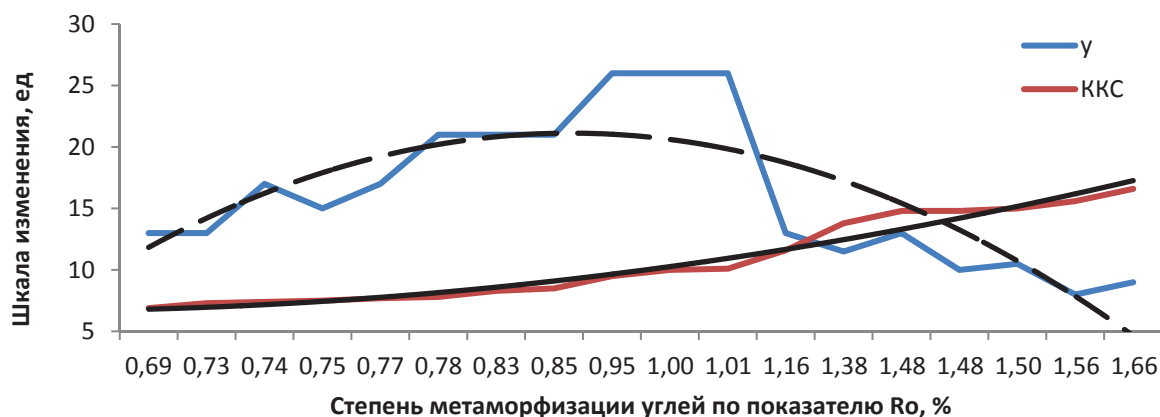


Рис. 1. Зависимость показателей спекающейся ( $y$ ) и коксующей ( $K^{KC}$ ) способностей углей от степени их метаморфизации ( $R_0$ )

Fig. 1. Dependence in indices of coal caking ( $y$ ) and and coking ( $K^{KC}$ ) capacities on their metamorphization degree ( $R_0$ )

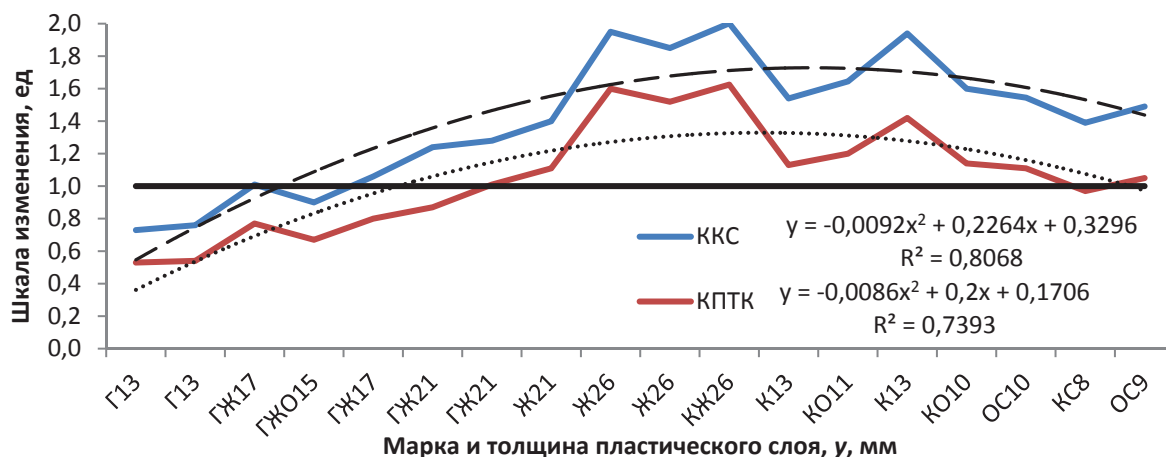


Рис. 2. Изменение показателей коксующей ( $K^{KC}$ ) и коксообразующей ( $K^{ПТК}$ ) способностей в углях с разной спекаемостью ( $y$ ) по маркам

Fig. 2. Change of indices of coking ( $K^{KC}$ ) and carbon-forming ( $K^{ПТК}$ ) capacities in coals with different caking capacity ( $y$ ) in brands

ции  $K^{ПТК}$  ниже, чем у показателя  $K^{KC}$ , что свидетельствует о значительном влиянии спекаемости на коксующую способность углей, чем на коксообразующую способность, которой в большей мере обладают угли марок К, КО, ОС, КС (рис. 2).

Анализ пограничных значений генетических ( $R_0, \Sigma OK$ ) и технологических ( $y, V^{dal}$ ) параметров маркировки углей соответственно, но в значениях показателей  $K^{ПТ}$  и  $K^{KC}$ , показал, что по графикам изменения данных показателей генетические и технологические свойства углей в ранжировании ГОСТ 25543–2013 по маркам не согласуются, и особенно это заметно в области угольных марок К, КО, ОС, К (рис. 3). По значениям показателя  $K^{ПТ}$  среди углей разных марок марочные витринитовые угли отличаются от фюзенизированных углей, что свидетельствует об их генетическом преимуществе, и это преимущество усиливается по мере метаморфизации углей марок К, КО, КС, ОС, ТС.

Результаты анализа подтверждается наблюдениями [28], сделанными при сравнении углей разных марок с эталонной шихтой [10]. Следовательно, марочная классификация не обеспечивает разделение углей по потребительским свойствам, но главное – марки не отражают коксующие свойства углей.

Предлагаемые показатели выполняют эту целевую задачу, и, как видно из рис. 2, показателю  $K^{KC} \geq 1,0$  ед. будет соответствовать в области углей газово-жирной стадии углефикации  $y=17$  мм, на коксовой стадии углефикации  $y=8$  мм. Аналогично показателю  $K^{ПТК} \geq 1,0$  ед. газово-жирных углей соответствует параметр  $y=21$  и  $y=10$  мм для коксовых углей.

Следовательно, спекающиеся угли с показателем  $K^{KC} \geq 1,0$  ед. будут коксующимися углями, а среди них с показателем  $K^{ПТК} \geq 1,0$  ед. – коксообразующими углями. Величина  $K^{KC} \geq 1,0$  ед. соответствует значению ПГЦ=0,66 ед., а показателю  $K^{ПТК} \geq 1,0$  ед. – показатель ТЦ=0,75 ед. (табл. 1).

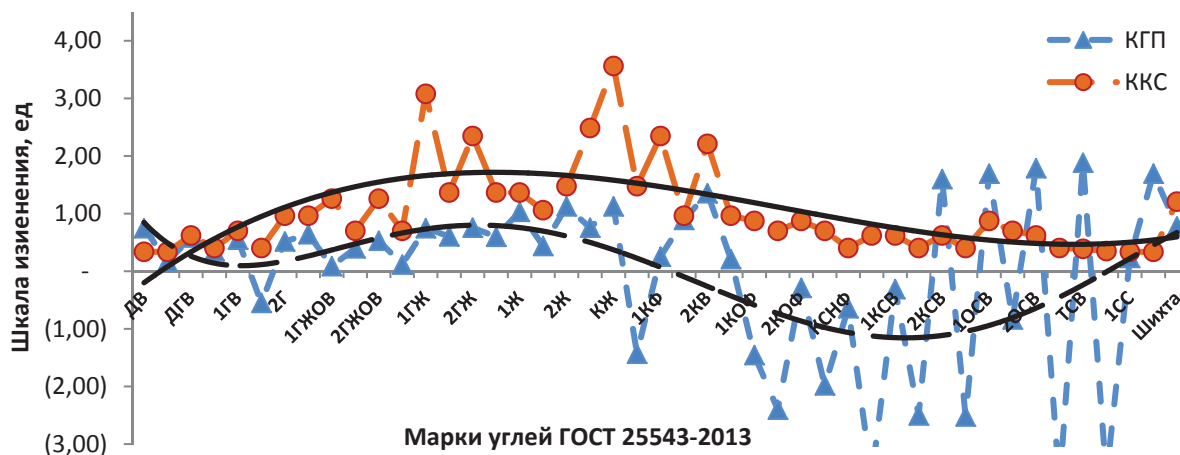


Рис. 3. Изменение показателей генетического преимущества ( $K^{ПТ}$ ) и коксующей способности ( $K^{KC}$ ) углей по маркам

Fig. 3. Changes of indices of coal genetic advantage ( $K^{ПТ}$ ) and coking capacity ( $K^{KC}$ ) in brands

**Таблица 1.** Сводная характеристика углей Донецкого, Карагандинского, Кузнецкого, Печорского бассейнов

**Table 1.** Summary characteristics of coals of Donetsk, Karaganda, Kuznetsk, Pechora basins

Стадии углефикации Carbonization stages	Показатели/Indices									
	$R_0$	СК	$V^{daf}$	$y$	Пв	$K^{rn}$	$K^{kc}$	ПГЦ	$K^{пкк}$	ТЦ
	Единицы измерения/Units				ед./units					
	%			мм mm	ед./units					
газовая gas	0,72	82	38	13	0,57	0,59	0,78	0,46	0,57	0,34
газово-жирная gas fat	0,75	87	38,1	17	0,55	0,65	<b>1,01</b>	<b>0,66</b>	0,76	0,5
	0,82	88	36,9	21	0,57	0,72	1,31	0,95	<b>1,04</b>	<b>0,75</b>
жирная fat	0,96	88	33,3	26	0,59	0,84	1,85	1,57	1,52	1,29
коксовая coking	1,38	71	20,2	13	0,59	0,98	1,81	1,78	1,34	1,31
кокс-тощая coking-noncoking	1,5	66	17,3	10	0,59	0,99	1,57	1,56	<b>1,12</b>	1,1
тощая noncoking	1,57	67	16,5	8	0,57	1,05	1,28	1,35	0,89	0,94

Определение промышленно-генетической ценности выполняется расчётом  $ПГЦ = K^{rn} + K^{kc}$ , а технологической ценности –  $ТЦ = K^{rn} + K^{пкк}$ .

Данные показатели в числовых значениях позволяют проводить деление углей по ценности и выступать в качестве критериев ценности, которым устанавливается технологическое направление использования спекающихся углей, а также отличие коксообразующих углей среди коксующихся, как ценных углей для производства доменного кокса, получаемого технологией слоевого коксования.

Кроме спекающихся углей, гумусовые каменные угли представлены слабо коксующимися, слабо спекающимися и неспекающимися углями, которые часто считают энергетическими углями, как угли пригодные для сжигания. Но среди них большая часть углей, кроме сжигания для обогрева, ис-

пользуется в металлургическом и неметаллургическом производствах, для энергогенерации на тепловых электростанциях. К этим углям предъявляются повышенные потребительские требования, главное из которых их способность к энергогенерации, т. е. способность углей среди других при равных условиях выделять максимальную энергию.

Способность энергогенерации угля ( $K^{эг}$ ) предлагается определять по формуле:

$$K^{эг} = \frac{Q_s^{afi}}{Q_s^{afconst}}, \quad (1)$$

где  $Q_s^{afi}$  – величина теплоты сгорания ископаемого каменного угля и антрацита, Мдж/кг;  $Q_s^{afconst}$  – нижняя предельная величина теплоты сгорания каменного угля – 24 Мдж/кг, равная максимальной теплоте сгорания бурых углей, установленная в ГОСТ 25543–2013.

На примере марочных углей Кузбасса (ГОСТ 50904–96) в значениях  $Q_s^{daf}$  (высшей теплоты сгорания на органическую массу) было установлено, что угли одних и тех же марок различаются по показателю  $K^{эг}$ , рассчитанному по формуле (1). Применяя его, стало возможным выделить три группы углей: низкокалорийные,  $K^{эг} \leq 1,25$  ед.; калорийные с  $K^{эг} = 1,25–1,35$  ед. и высококалорийные с показателем  $K^{эг} \geq 1,35$  ед., а по показателю ЭЦ различать угли по энергетической ценности (табл. 2).

Такое деление можно проводить по показателю нижней теплоты сгорания,  $Q_i'$ , так как при этом состоянии учитывается влажность и зольность угля. Граничным значением на практике признаётся показатель  $Q_i' > 6000$  ккал/кг, и по нему отделяются высококалорийные угли среди остальных углей.

Такой уровень теплоты сгорания обеспечивается за счёт природных условий образования низкозольных углей, или за счёт обогащения зольных углей. Поэтому при определении промышленной и энергетической ценности ископаемых углей следует учитывать содержание в угольном веществе минеральных примесей.

**Таблица 2.** Сводная характеристика углей Кузнецкого и Горловского бассейнов по маркам и энергетической ценности

**Table 2.** Summary characteristics of coals of Kuznetsk and Gorlovsky basins by the brands and energy value

Характеристика ископаемых углей по спекаемости и стадии метаморфизма Characteristic of mineral coals by caking and coal rank	Марки Brands	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг (Мдж) kcal/kg (MJ)	$R_0$	СК	$K^{rn}$	$K^{эг}$	ЭЦ
			%		ед./units		
Слабоспекающиеся и неспекающиеся угли низкой стадии метаморфизма Low-caking and noncaking coals of low coal rank	Д	7280 (30,48)	0,67	82	0,55	1,22	0,67
	Д, ДГ	7700 (32,24)	0,73	80	0,58	1,29	0,75
	ДГ, Г, ГЖО	7780 (33,57)	0,78	88	0,69	1,34	0,92
	ДГ, Г, СС (1СС и 2СС)	7980 (33,41)	0,83	78	0,65	1,34	0,87
Коксующиеся угли низкой, средней и высокой стадий метаморфизма Coking coals with low, middle and high coal rank	ГЖО, ГЖ, Д	8280 (34,67)	0,95	70	0,88	1,39	1,22
	КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС		1,15	60	0,91	1,39	1,26
Слабоспекающиеся и неспекающиеся угли высокой стадии метаморфизма Low-caking and noncaking coals of high coal rank	ТС, Т, СС (ЗСС)	8150 (34,12)	1,45	50	1,15	1,36	1,52
	Т, А		1,8	66	1,19	1,36	1,62
	А	8200 (33,54)	2,5	47	1,18	1,34	1,58

**Таблица 3.** Промышленно-энергетическая классификация ископаемых углей**Table 3.** Industrial-energy classification of mineral coals

Вид/Type	Каменные угли/Hard coal				
Группа Group	Обогащаемые (raw coal) $\gamma \geq 75\%$			Трудно обогащаемые (hard-to-clean) $\gamma \leq 75\%$	
Подгруппа Subgroup	Спекающиеся Caking	Слабо коксующиеся Low-coking		Спекающиеся и неспекающиеся Caking and noncaking	
Параметрические ограничения Parametric limiting	$y > 13$ мм или $FSI > 4$ ед., в интервале $V^{daf} 30-41\%$ ; $y > 8$ мм или $FSI > 2$ ед., в интервале $V^{daf} 19-30\%$	$y \leq 13$ мм; $FSI > 1$ ед., в интервале $V^{daf} \geq 41\%$ ; $y \leq 8$ мм; $FSI > 1$ ед., в интервале $V^{daf} \leq 19\%$		$y \leq 6$ мм; $FSI \leq 1$ ед.	
Ранг назначения Purpose rank	Технологические Engineering			Энергетические Energy	
Класс/Class	Коксующиеся/Coking	Энерготехнологические/Energotechnological			Топливные Fuel
Тип/Type	Коксообразующие Carbon-forming	Технологические коксующиеся Engineering coking	Энерго-технические Energy-engineering	Энергогенерирующие Power-generating	Топливные Fuel
Параметрические ограничения Parametric limiting	$K^{ПК} \geq 1,0$ ед.; $A^d = 7-9\%$ ; $y \geq 21-35$ мм, в интервале $V^{daf} = 30-36\%$ ; $y \geq 10$ мм; в интервале $V^{daf} = 19-30\%$	$K^{КС} \leq 1,0$ ед.; $A^d = 7-9\%$ ; $13 \leq y \leq 21$ м, в интервале $V^{daf} = 38-41\%$ ; $8 \leq y \leq 10$ мм; в интервале $V^{daf} = 17-19\%$	$K^{КС} \geq 0,80$ ед. или $K^{ЗТ} \geq 1,3$ ед.; $W \leq 10\%$ ; $A^d \leq 10\%$ ; $Q_r \geq 6000$ ккал/кг; $S_t \leq 0,3\%$ ; $P^d \leq 0,01\%$	$K^{ЗТ} \geq 1,25$ ед.; $W \leq 10\%$ ; $A^d \leq 15\%$ ; $Q \geq 6000$ ккал/кг; $S_t = 0,3-1,0\%$	$K^{ЗТ} \leq 1,25$ ед.; $W \geq 10\%$ ; $A^d \geq 15\%$
Основные технологии глубокой переработки Basic techniques of advanced processing	слоевое коксование laminar coking	слоевое коксование, производство синтетического топлива, газификация laminar coking, production of synthetic fuel, gasification	кусковое полукоксование и коксование, заменители коксов в металлургических и неметаллургических производствах lumpy semi-coking and coking, coke substitutes in metallurgical and non-metallurgical production	пылеугольное топливо для доменного производства и энергетических установок; кусковое сжигание в котлах отопительных станций и технологических установках; получения бездымного топлива pulverized fuel for blast-furnace process and power plants; lumpy combustion in boilers of heating stations and plants; obtaining pollution-free fuel	Сжигание в плазме и низкотемпературным окислением разными технологиями и способами Combustion in plasma and by low-temperature oxidation in different ways

Кондиции запасов по зольности для коксующихся углей  $A^d < 30\%$ , для энергетических углей –  $A^d < 35\%$ , это максимально допустимые пределы при установлении балансовых запасов. На практике значительная группа углей с зольностью  $30\%$  обогащается трудно или очень трудно. В таких углях выход обогащённого угля с зольностью  $10\%$  составляет ниже  $75\%$ , поэтому для коксующихся необогащённых углей принята зольность угольного сырья не более  $25\%$ , что обеспечивает выход концентрата более  $75\%$  при  $A^d < 10\%$ .

Ценными углями считаются угли с низким содержанием серы и фосфора, поэтому среди энергетических углей, особенно неспекающихся углей, ценятся угли с показателями  $A^d < 10\%$ ,  $S_t < 0,3\%$  и  $P^d < 0,01\%$ , а среди слабококсующихся углей – угли с пластическим слоем от  $13$  до  $17$  мм, которые имеют значения  $K^{КС}$  более  $0,80$  ед. Данные факторы необходимо учитывать, так как данная группа углей на практике характеризуется «углями двойного назначения».

На основе новых показателей разработана промышленно-энергетическая классификация углей с выделением основных технологических и энергетических направлений их глубокой переработки (табл. 3). Также она пригодна для разделения углей при налогообложении и для таможенных целей взамен существующих показателей [6, 7], поэтому наравне с маркой предлагается применять новую классификацию.

#### Вывод

1. Показатели, определяющие генетическое преимущество и коксующую, коксообразующую и энергогенерирующую способности углей, позволяют разделять их по генетическим и технологическим свойствам.
2. Предложенная промышленно-энергетическая классификация, как потребительская классификация, дополняет промышленно-генетическую классификацию (ГОСТ 25543–2013) в части определения рационального использования углей при их глубокой переработке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sahu H.B., Mahapatra S.S., Panigrahi D.C. An empirical approach for classification of coal seams with respect to the spontaneous heating susceptibility of Indian coals. *International Journal of Coal Geology*. – 2009. – V. 80. – Iss. 3–4. – P. 175–180.
- Vassilev S.V., Vassileva Ch.G. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 1. Chemical and mineral classification systems // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – Iss. 2. – P. 235–245.
- Mazumder B. Coal structure and classification // *Coal Science and Engineering*. – India: Woodhead Publ., 2012. – P. 76–99, 426–451.
- Honaker R.Q., Boaten F., Luttrell G.H. Ultrafine coal classification using 150 mm gMax cyclone circuits // *Minerals Engineering*. – 2007. – V. 20. – Iss. 13. – P. 1218–1226.
- Beyene A., Moman A. Process oriented industrial classification based on the intensity // *Applied thermal engineering*. – 2006. – V. 26. – Iss. 17–18. – P. 2079–2086.
- Vassilev S.V., Vassileva Ch.G. A new technological classification of low-rank coal on the basis of Polish deposits. *Fuel*. – 2012. – V. 96. – P. 497–510.
- Ercegovic M., Životić D., Kostić A. Genetic-industrial classification of brown coals in Serbia. *International Journal of Coal Geology*. – 2006. – V. 68. – Iss. 1–2. – P. 39–56.
- Промышленно-генетическая классификация углей / А.И. Аммосов, Б.Г. Бабашкин, Н.Ф. Гречишников, И.В. Ерёмин, Г.С. Калмыков, В.К. Прянишников. – М.: Наука, 1964. – 176 с.
- Золотухин Ю.А. Об оценке угольной сырьевой базы коксования. Марочный критерий оптимальности состава угольных шихт // *Кокс и химия*. – 2008. – № 12. – С. 2–10.
- Киселёв Б.П. Методика для определения коэффициентов технологической ценности угольного сырья, используемого в РФ для производства кокса. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «ВУХИН», 2009. – 12 с.
- Еремин И.В., Броневец Т.М. Марочный состав углей и их рациональное использование: справочник. – М.: Недра, 1995. – 254 с.
- ГОСТ 25543–2013 Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.
- Иванов В.П. Промышленно-генетическая ценность каменных углей // *Кокс и химия*. – 2009. – № 11. – С. 2–10.
- Методические рекомендации по дифференциальной идентификации углей, полукоксов и коксов группы 27, позиции 2701, 2702 и 2704, субпозиции 2701 11, 2701 12 ЕТН ВЭД России. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «ВУХИН», 2011. – 46 с.
- Постановление Правительства РФ № 486 от 20.06.2011 г. «Об утверждении классификации углей, являющихся объектом налогообложения налогом на добычу полезных ископаемых». Опубликовано 31.12.2010 года. URL: [http://ips.pravo.gov.ru/?searches=&bpras=c00000&textpres=&sort=7&a6=102000066&a3=102000496&a6\\_a3=102000066\\_102000496&a8=486&a8type=2&a1=&a7type=4&a7from=&a7to=&input-date\(дата обращения: 18.05.2015\)](http://ips.pravo.gov.ru/?searches=&bpras=c00000&textpres=&sort=7&a6=102000066&a3=102000496&a6_a3=102000066_102000496&a8=486&a8type=2&a1=&a7type=4&a7from=&a7to=&input-date(дата обращения: 18.05.2015)).
- Станкевич А.С., Станкевич В.С. Методика определения коксуемости и технологической ценности углей пластов и их смесей // *Кокс и химия*. – 2012. – № 1. – С. 4–12.
- Иванов В.П. Оценка технологической ценности каменных углей для коксования на основе их генетических и технологических преимуществ // *Кокс и химия*. – 2008. – № 6. – С. 2–9.
- Иванов В.П., Бондаренко И.С. Параметры тела кокса // *Кокс и химия*. – 2013. – № 9. – С. 28–33.
- Угольная база России. Т. VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России / под ред. В.Ф. Череповского. – М.: Геоинформмарк, 2004. – 779 с.
- ГОСТ 17070–87 Угли. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2003. – 15 с.
- Броневец Т.М., Гагарин С.Г. Характеристика относительной ценности энергетических и коксующихся углей // *Кокс и химия*. – 2003. – № 1. – С. 3–10.
- Ценность углей для коксования. Методика её определения / И.Д. Дроздник, Ю.В. Зингерман, М.В. Лурье и др. // *Кокс и химия*. – 1990. – № 3. – С. 2–4.
- Барский В.Д. Ценность углей и её определение // *Кокс и химия*. – 1991. – № 4. – С. 6–8.
- Киселёв Б.П., Стахеев С.Г. Технологическая ценность угольного сырья. Угли, обеспечивающие спекаемость смесей для производства кокса // *Кокс и химия*. – 2012. – № 7. – С. 2–5.
- Станкевич А.С., Станкевич В.С. Определение технологической ценности углей, используемых для производства кокса // *Кокс и химия*. – 2011. – № 6. – С. 2–10.
- Иванов В.П. Проблемы и решения классификации углей и типизации угольных запасов/ресурсов России // *Разведка и охрана недр*. – 2013. – № 6. – С. 31–33.
- Иванов В.П., Бондаренко И.С., Пантыкин С.А. Коксующая способность и генетическая совместимость как признаки технологической ценности ископаемых углей для слоевого коксования // *Кокс и химия*. – 2011. – № 12. – С. 8–16.
- Сырьевая база коксующихся углей Кузбасса. Обеспеченность запасами и их технологическая ценность для коксования / В.П. Иванов, В.Ю. Сушков, А.А. Торгунаков, С.А. Пантыкин // *Кокс и химия*. – 2008. – № 9. – С. 12–18.

Поступила 19.05.2015 г.

UDC 551.263.94

## INDUSTRIAL AND ENERGY CLASSIFICATION TO ESTIMATE THE RATIONAL COAL USE

Vladimir P. Ivanov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ivp2005@mail.ru

The variety of coals in origin, properties and quality makes it necessary to unify them, so there are different classifications of coals based on material composition, structure, genesis, consumption and so on. The greatest need of coal classification is dividing them into groups for rational use in industry and in energy sector.

**The main aim of the study is to develop industrial and energetic classification based on the proposed parameters of coal value: genetic advantage, coking and coke-forming abilities, and standardized parameters: ash content, yield of volatile matter, plastic layer thickness, heat of combustion, which are used to determine coal quality.**

**The methods used in the study.** Critical analysis of GOST 25543–2013 (grade classification by genetic and technologic parameters for defining the direction of their consumption) with new parameters: KGA (genetic advantage of coals between themselves), KCA (coking ability) and KITV (coke-forming ability), shows the impossibility of distinguishing coking coals among caking only by yield of volatile matter and caking power (thickness of the plastic layer). Assessment of energetic ability allows reasonably distinguishing the energetic coals among others, including antracites.

**The results.** The proposed industrial and energetic classification is aimed on improvement of coal classification and allows distinguish coking coals among caking, and coke-forming among them, and distinguishing energetic and fuel coals among non-caking. It was proposed to divide humic coals on technological, energy-technological and fuel coals by main directions of their use for deep processing, with industrial and genetic value, technological and energetic value as assessment criteria. Industrial-energetic classification is positioned as addition to GOST 25543–2013 in part of dividing coal by direction of their consumption.

**Key words:**

Coal, unification brand of coal, industrial-genetic classification, usage of coal, measure of value, industrial-energy classification.

## REFERENCES

- Sahu H.B., Mahapatra S.S., Panigrahi D.C. An empirical approach for classification of coal seams with respect to the spontaneous heating susceptibility of Indian coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 80, Iss. 3–4, pp. 175–180.
- Vassilev S.V., Vassileva Ch.G. A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 1. Chemical and mineral classification systems. *Fuel*, 2009, vol. 88, Iss. 2, pp. 235–245.
- Mazumder B. Coal structure and classification. *Coal Science and Engineering*. India, Woodhead Publ., 2012. pp. 76–99, 426–451.
- Honaker R.Q., Boaten F., Luttrell G.H. Ultrafine coal classification using 150 mm gMax cyclone circuits. *Minerals Engineering*, 2007, vol. 20, Iss. 13, pp. 1218–1226.
- Beyene A., Moman A. Process oriented industrial classification based on the intensity. *Applied thermal engineering*, 2006, vol. 26, Iss. 17–18, pp. 2079–2086.
- Vassilev S.V., Vassileva Ch.G. A new technological classification of low-rank coal on the basis of Polish deposits. *Fuel*, 2012, vol. 96, pp. 497–510.
- Ercegovic M., Životić D., Kostić A. Genetic-industrial classification of brown coals in Serbia. *International Journal of Coal Geology*, 2006, vol. 68, Iss. 1–2, pp. 39–56.
- Ammosov A.I., Babashkin B.G., Grechishnikov N.F., Eremin I.V., Kalmykov G.S., Pryanishnikov V.K. *Promyshlennogeneticheskaya klassifikatsiya ugley* [Industrial and genetic coal classification]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 176 p.
- Zolotukhin Yu.A. Ob otsenke ugolnoy syrevoy bazy koksovaniya. Marochny kriteriy optimalnosti sostava ugolnykh shikht [Assessment of coking coal base. Brand criteria of optimal coal composition]. *Coke and Chemistry*, 2008, no. 12, pp. 2–10.
- Kiselev B.P. *Metodika dlya opredeleniya koeffitsientov tekhnologicheskoy tsennosti ugolnogo syrya, ispolzuemogo v RF dlya proizvodstva koks* [Methods for defining coefficients of technological value of coals used in RF for coke production]. Ekaterinburg, VUHIN Publ., 2009. 12 p.
- Eremin I.V., Bronovets T.M. *Marochny sostav ugley i ikh ratsionalnoe ispolzovanie. Spravochnik* [Brand consistence of coals and their rational use. Reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 254 p.
- GOST 25543–2013. *Ugli burye, kamennye i antratsity. Klassifikatsiya po geneticheskim i tekhnologicheskim parametram* [State standard 25543–2013. Lignites, coals and antracites. Classification by genetic and technological parameters]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 18 p.
- Ivanov V.P. Promyshlennogeneticheskaya tsennost kamennykh ugley [Industrial and genetic value of coals]. *Coke and Chemistry*, 2009, no. 11, pp. 2–10.
- Metodicheskie rekomendatsii po differentsialnoy identifikatsii ugley, polukoksov i koksov gruppy 27, pozitsii 2701, 2702 i 2704, subpozitsii 2701 11, 2701 12 ETN VEHD Rossii* [Methodical recommendations for differential identification of coals, semi-cokes and cokes of group 27, position 2701, 2702 and 2704, subposition 2701 11, 2701 12 UCT of the CU of Russia]. Ekaterinburg, VUHIN Publ., 2011. 46 p.
- Postanovlenie Pravitelstva RF no. 486 ot 20.06.2011 g. «Ob utverzhdenii klassifikatsii ugley, yavlyayushchikhsya obektom nalogooblozheniya nalogom na dobychu poleznykh iskopaemykh»* [About approval of coal classification of chargeable coals]. Available at: [http://ips.pravo.gov.ru/?searchres=&bpas=cd00000&textpres=&sort=7&a6=102000066&a3=102000496&a6\\_a3=102000066\\_102000496&a8=486&a8type=2&a1=&a7type=4&a7from=&a7to=&input-date](http://ips.pravo.gov.ru/?searchres=&bpas=cd00000&textpres=&sort=7&a6=102000066&a3=102000496&a6_a3=102000066_102000496&a8=486&a8type=2&a1=&a7type=4&a7from=&a7to=&input-date) (accessed 18 May 2015)
- Stankevich A.S., Stankevich V.S. Metodika opredeleniya koksuesti i tekhnologicheskoy tsennosti ugley plastov i ikh smesey [Methods of defining coking behavior and technological value of layer coals and their composites]. *Coke and Chemistry*, 2012, no. 1, pp. 4–12.
- Ivanov V.P. Otsenka tekhnologicheskoy tsennosti kamennykh ugley dlya koksovaniya na osnove ikh geneticheskikh i tekhnologicheskikh preimushchestv [Assessment of technological value of coals for coking based on their genetic and technological advantages]. *Coke and Chemistry*, 2008, no. 6, pp. 2–9.

18. Ivanov V.P., Bondarenko I.S. Parametry tela koksa [Parameters of coke body]. *Coke and Chemistry*, 2013, no. 9, pp. 28–33.
19. *Ugolnaya baza Rossii. T. VI. Osnovnye zakonomernosti ugleobrazovaniya i razmeshcheniya uglunosnosti na territorii Rossii* [Coal base of Russia. T. VI. Basic regularities of coal formation and carboniferous allocation on the territory of Russia]. Ed. by V.F. Cherepovsky. Moscow, Geoinformmark Publ., 2004. 779 p.
20. *GOST 17070–87 Ugli. Terminy i opredeleniya* [State standard 17070–87 Coals. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 15 p.
21. Bronovets T.M., Gagarin S.G. Kharakteristika otnositelnoy tsennosti energeticheskikh i koksuyushchihsya ugley [Characteristic of relational value of energetic and coking coals]. *Coke and Chemistry*, 2003, no. 1, pp. 3–10.
22. Drozdnyk I.D., Zingerman Yu.V., Lure M.V. Tsennost ugley dlya koksovaniya. Metodika ee opredeleniya [Coal value for coking. Methods of its definition]. *Coke and Chemistry*, 1990, no. 3, pp. 2–4.
23. Barsky V.D. Tsennost ugley i ee opredelenie [Coal value and its definition]. *Coke and Chemistry*, 1991, no. 4, pp. 6–8.
24. Kiselev B.P., Stakheev S.G. Tekhnologicheskaya tsennost ugolnogo syrya. 1. Ugli, obespechivayushchie spekaemost smesey dlya proizvodstva koksa [Technological value of raw coals. 1. Coals providing coal caking for coke production]. *Coke and Chemistry*, 2012, no. 7, pp. 2–5.
25. Stankevich A.S., Stankevich V.S. Opredelenie tekhnologicheskoy tsennosti ugley, ispolzuemykh dlya proizvodstva koksa [Definition of technological value of coals used for coke production]. *Coke and Chemistry*, 2011, no. 6, pp. 2–10.
26. Ivanov V.P. Problemy i resheniya klassifikatsii ugley i tipizatsii ugolnykh zapasov/resursov Rossii [Problems and solutions of coal classification and typization of coal reserves/resources of Russia]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2013, no. 6, pp. 31–33.
27. Ivanov V.P., Bondarenko I.S., Pantykin S.A. Koksuyushchaya sposobnost i geneticheskaya sovmestimost kak priznaki tekhnologicheskoy tsennosti iskopaemykh ugley dlya sloevogo koksovaniya [Coking ability and genetic compatibility as features of technological value of coals for layer coking]. *Coke and Chemistry*, 2011, no. 12, pp. 8–16.
28. Ivanov V.P., Sushkov V.Yu., Torgunakov A.A., Pantykin S.A. Syrevaya baza koksuyushchihsya ugley Kuzbassa. Obespechenost zapasami i ikh tekhnologicheskaya tsennost dlya koksovaniya [Base of coking coals of Kuzbass. Reserves security and their technological value for coking]. *Coke and Chemistry*, 2008, no. 9, pp. 12–18.

Received: 19 May 2015.

УДК 553.041; 553.69

## ЛИТОЛОГИЯ ПОРОД ТУРТАССКОЙ СВИТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ПРИМЕРЕ УСПЕНСКОЙ ПЛОЩАДИ (ТЮМЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

**Смирнов Павел Витальевич,**

аспирант каф. геологии месторождений нефти и газа Тюменского государственного нефтегазового университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; науч. сотр. Института Криосферы Земли СО РАН, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. E-mail: geolog.08@mail.ru

**Иванов Константин Сергеевич,**

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Института Криосферы Земли СО РАН, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. E-mail: sillicium@bk.ru

**Константинов Александр Олегович,**

мл. науч. сотр. Института Криосферы Земли СО РАН, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

*Актуальность работы определяется необходимостью расширения местной минерально-сырьевой базы Тюменской области для производства большой номенклатуры современных строительных и теплоизоляционных пеностеклокерамических материалов.*

**Цель работы:** изучение минерального и химического состава отложений туртасской свиты верхнего олигоцена с целью определения возможности их использования в качестве сырья для производства современных строительных и теплоизоляционных пеностеклокерамических материалов на примере Успенской площади (Тюменская область).

**Методы исследований:** полевые исследования, макроскопические исследования, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеноструктурный анализ, петрографический анализ, электронная микроскопия, диатомовый анализ, технологические испытания в соответствии с патентом РФ № 2464251 и ТУ 5764–001–90903792–2013.

**Результаты.** Проведенные исследования показывают, что значительное содержание сложных рентгеноаморфным опалом панцирей диатомей и их фрагментов (до 10 %) в сочетании со смешаннослойными образованиями (коренсит, тосудит и др.), слагающими глинистую часть в отложениях туртасской свиты, обеспечивают активное взаимодействие со слабыми щелочами и, соответственно, определяют широкие возможности их применения в качестве сырья для производства пеностеклокерамических материалов. В ходе опытных испытаний получены образцы пеностеклокерамических материалов, которые соответствуют патенту РФ № 2464251 и ТУ 5764–001–90903792–2013 по следующим характеристикам: насыпная плотность, прочность при сжатии, водопоглощение по объёму, коэффициент размягчения и теплопроводность. Многофункциональность материала позволяет планировать выпуск широкой линейки продукции, востребованной в промышленном, гражданском малоэтажном и каркасном, дорожном строительстве, нефтегазовой отрасли, ландшафтном дизайне: стеновых блоков, сухих строительных смесей, заполнителя бетонов, блочной пеностеклокерамики, насыпного теплоизолятора для дорог и оснований.

### **Ключевые слова:**

Кремнистые породы, силициты, туртасская свита, пеностекло, Тюменская область.

### **Введение**

В рамках программы совместных исследований ООО «ТИП-ИК-1» и Института Криосферы Земли СО РАН по изучению опал-кристобалитовых пород организованы поисково-разведочные работы на кремнистое сырье на юге Тюменской области. Исследования призваны определить перспективы расширения минеральной базы Тюменской области, которая нуждается в сырье для производства большой номенклатуры прогрессивных строительных и теплоизоляционных материалов.

В предыдущей работе [1] нами отмечалось, что ввиду значительных глубин залегания опал-кристобалитовых пород ирбитской свиты на юге Тюменской области, своеобразной «альтернативой» диатомитам и опокам для производства пеностеклокерамических материалов могут выступать породы туртасской свиты верхнего олигоцена, которые в значительной мере обогащены обломками диатомей и спикулами губок [2]. Принимая во внимание тот факт, что на дочетвертичной площади Западной Сибири туртасская свита занимает самую большую площадь [3] и характеризуется мощностью до 30 м, можно утверждать, что туртасские отложения обладают значительным ресурсным потенциалом. Для практического подтверждения данной гипотезы в непосредственной близости от г. Тюмень была исследована Успенская площадь (рис. 1). Рассматриваемая территория характеризуется высокой степенью геологической изученности, малой мощностью плиоцен-четвертичных отложений и наличием карьерной выработки.

В соответствии с Государственной геологической картой Российской Федерации [4] на изучаемой площади развиты отложения куртамышской свиты нижнего олигоцена ( $P_3kr$ ), перекрытые озерно-аллювиальными отложениями IV надпойменной террасы (лимноаллювий и лимний сузгунской толщи неоплейстоценового возраста). Однако, согласно данным разрезов гидрогеологических сква-



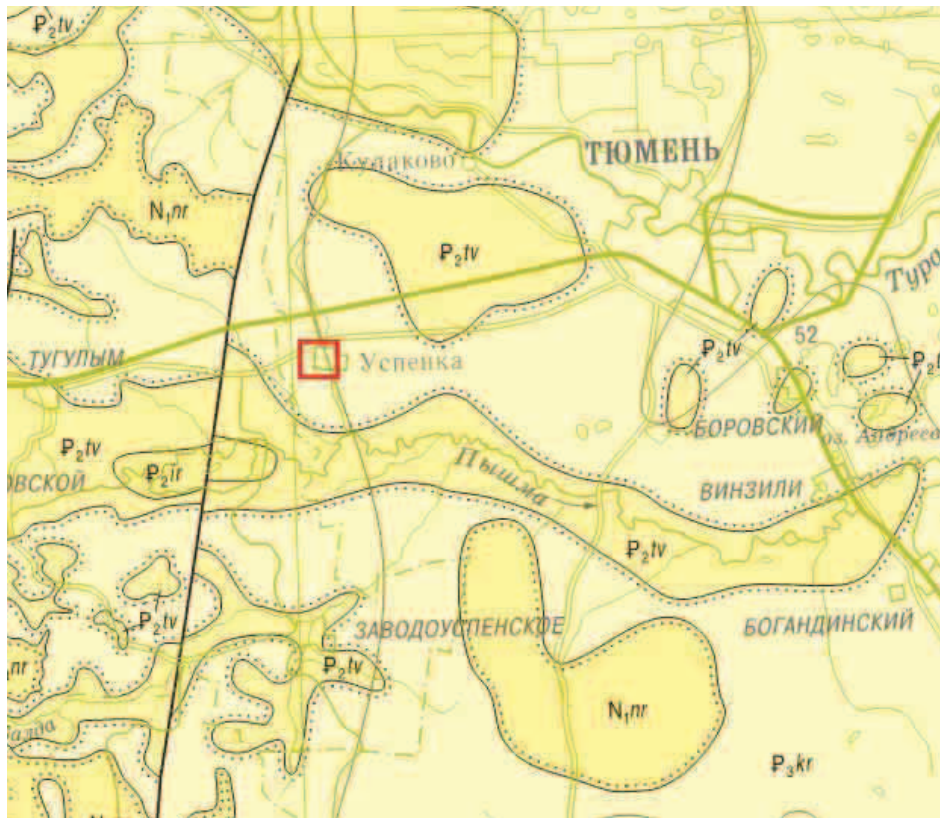


Рис. 1. Схема размещения Успенского участка

Fig. 1. Uspensky area

жин в районе с. Успенка [5, 6], четвертичные отложения перекрывают породы туртасской свиты ( $P_3tr$ ), а отложения куртамышской свиты частично размыты и картируются в виде отдельных останцов в толще тавдинской свиты.

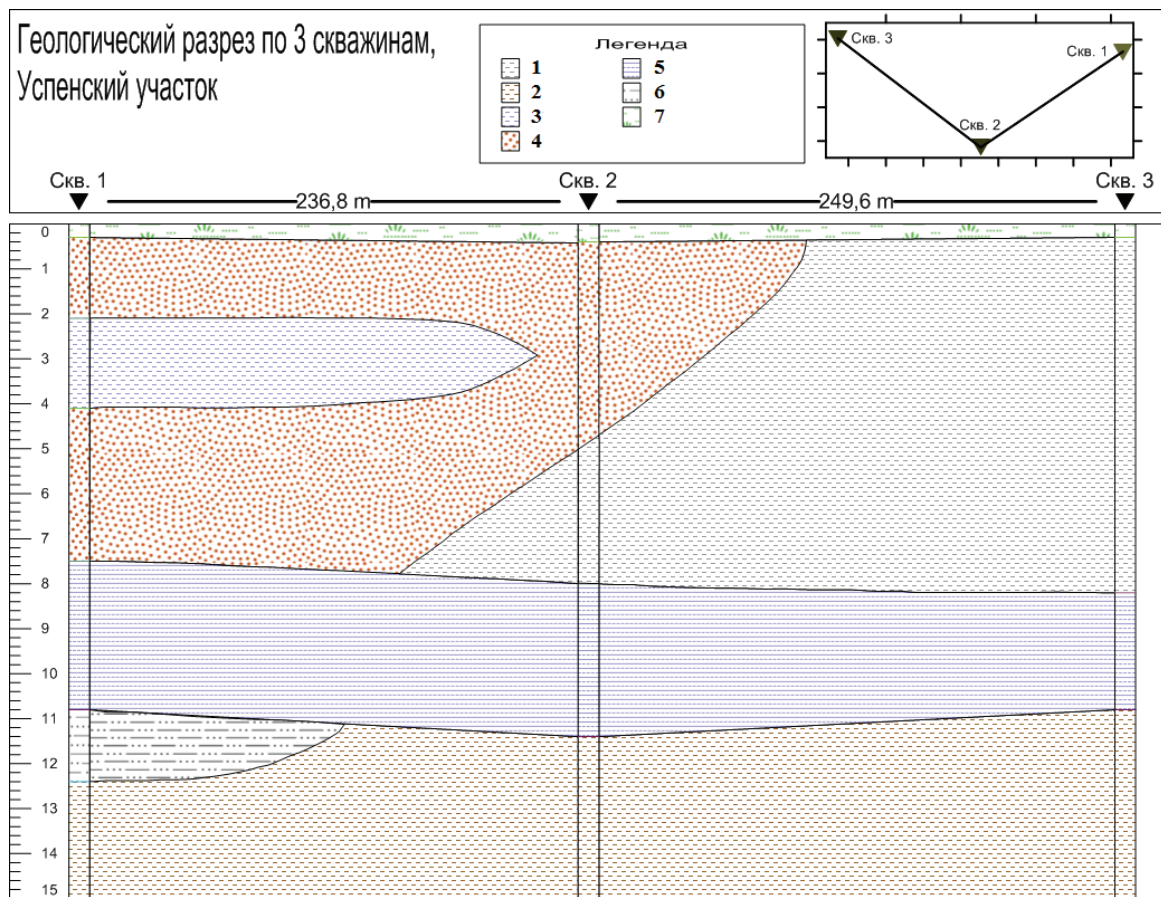
Успенская площадь располагается в пределах междуречья рек Туры и Пышмы. Исследуемая территория характеризуется равнинным слабонаклонным в сторону речных долин рельефом с абсолютными отметками 65–90 м [7]. Геологическое изучение района началось в 1956–1961 гг. поисково-разведочными партиями Уральского и Тюменского геологических управлений. Уже тогда было отмечено широкое распространение глин в пределах зоны развития отложений IV надпойменной террасы [8].

В рамках утвержденной программы исследований в июне–августе 2014 г. на площади было проведено бурение поисковых скважин глубиной 15 м и произведен отбор рядовых и технологических проб на кремнистое сырье. Местоположение скважин определялось по морфологическим признакам при рекогносцировочном обследовании. Для оценки перспективности отложений туртасской свиты было пробурено 3 скважины, объемом 45 погонных метров (рис. 2). Бурение скважин проводилось с использованием самоходной буровой установкой ПБУ-2 на ЗИЛ 131/Н1 колонковым способом. В процессе бурения велось визуальное описание разреза, фиксировались литологиче-

ские границы и уровни грунтовых вод. Глубина залегания грунтовых вод на территории площадки варьируется в пределах от 3 до 9 м. Горизонт безнапорный.

Макроскопически породы диагностируются как суглинки и супеси, светло-серые, с буровато-коричневым оттенком, довольно прочные (слабо пачкают пальцы при контакте с ней), с почти массивной текстурой (рис. 3). Порода сложена разно-размерными обломками – от алевро-пелитовой до среднезернистой песчаной гранулометрических фракций, а также редкими полуокатанными обломками гравийной размерности, сцементированными глинистым материалом. Часть зерен кварца обладает регенерационными гранями. Присутствуют также немногочисленные мелкие чешуйки слюд и хлоритов. Отмечаются редкие мелкие и очень мелкие зерна черного, реже бурого цвета, представляющие собой, углефицированный растительный детрит, а также единичные зерна рудных минералов. Бурый оттенок образца обусловлен наличием в нём тонких пленок гидроокислов железа.

Породы – от рыхлых алевроитовых до плотных опоквидных разностей. Сцементированность и опоквидность растет вниз по разрезу. Породы с глубин более 10 м при ударе не рассыпаются, а растрескиваются, образуя характерные для опоквидных и окремнелых пород сколы и поверхность. Реакция с HCl отсутствует.



**Рис. 2.** Геологический разрез по 3 скважинам: 1 – суглинок серо-коричневый мягкопластичный; 2 – суглинок серый мягкопластичный; 3 – суглинок серый тугопластичный; 4 – песок мелкозернистый серо-коричневый; 5 – супесь серая текучая; 6 – суглинок мягкопластичный с прослоями супеси; 7 – почвенно-растительный слой

**Fig. 2.** Geological section by three wells: 1 – gray-brown high-plastic loam; 2 – gray high-plastic loam; 3 – gray low-plastic loam; 4 – gray-brown fine-grained sand; 5 – gray fluid sandy loam; 6 – high-plastic loam with sandy loam bands; 7 – topsoil



**Рис. 3.** Внешний вид кремнистой породы

**Fig. 3.** Siliceous strata appearance

На базе Красноярского научного центра СО РАН и ООО «ЗапСибГЦ» рентгено-флуоресцентным спектрометром Bruker S2 RANGER проведен химический анализ кремнистых пород. Перед проведением анализа предварительно дезинтегрированные пробы сушились, затем прокаливались в

муфельной печи. Судя по светло-серой окраске изученных проб, содержание органического вещества в них невелико и не превышает 0,1–0,3 %, поэтому основная часть потерь при прокаливании обусловлена выделением из анализируемых образцов различных типов воды.

Основным компонентом является двуокись кремния – содержание варьируется от 65,9 до 74,4 %; в подчиненном количестве – оксиды  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  (табл. 1). Содержание кремнезема с глубиной увеличивается, содержание оксидов литофильных металлов, наоборот, уменьшается. Количество глинозема не превышает 15 %. Определено присутствие в незначительном количестве оксидов Cu, Zn, Cr, V, Sr и др. Обращает на себя внимание повышенное содержание Ti и Zr. В Западной Сибири повышенные концентрации этих элементов характерны для куртамышской и туртасской свит нижнего и верхнего олигоцена [9], поэтому присутствие Ti и Zr в данном случае является своеобразным репером возраста.

Набор рефлексов на дифрактограммах подтверждает их полиминеральный состав. Благодаря вы-

**Таблица 1.** Результаты определения химического состава пород. Скважина 3

**Table 1.** Results of determination of rock chemical composition. Well 3

№ обр. Sample	ППП, % LOI, %	Химический состав, % / Chemical composition, %												
		Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>
1	2,16	0,369	2,36	14,30	69,60	0,06	0,198	0,321	2,74	1,30	1,22		7,33	
2	2,13	0,392	2,63	13,70	70,40	0,07	0,287	0,432	2,67	1,29	1,28		6,91	0,114
3	2,55	0,488	2,69	13,20	70,60	0,06	0,513	0,522	2,75	1,35	1,36		6,80	0,104
4	2,56	0,523	2,50	13,10	69,80	0,08	0,438	0,289	2,51	3,63	1,15		6,13	
7	2,83	0,729	2,34	12,60	65,90	0,09	0,890	1,140	2,90	3,62	1,77		7,86	0,104
8	3,23	0,860	1,51	13,10	71,30	0,11	0,250	0,008	2,42	2,19	0,93	0,091	3,75	0,065
9	3,44	0,767	2,89	11,90	71,00	0,12	0,542	0,74	2,56	3,36	1,34	0,092	4,80	0,091
12	4,92	0,601	1,63	11,50	74,40	0,07	0,620	1,00	2,56	2,01	1,46	0,097	3,99	0,123
13	5,83	0,410	1,56	14,30	67,20	0,08	0,280	0,005	2,13	1,45	1,13	0,091	5,50	0,057
15	6,03	0,418	2,16	12,90	72,10	0,08	0,376	0,365	2,24	1,42	1,32		6,53	

Пустые графы – содержание ниже предела определения или отсутствие; ППП – потери при прокаливании.  
Empty graphs – content is lower than the determination limit or absence; LOI – loss on ignition.

сокой степени кристалличности, наиболее интенсивными и ярко выраженными являются пики кварца, основными диагностическими линиями которого являются 3,357. Исходя из величины главного пика можно приблизительно судить о количественном содержании кварца.

По данным интерпретации дифрактограммы, порода сложена обломками кварца (81 %), калиевого полевого шпата или микроклина (6 %) и кислым плагиоклазом или альбитом (5 %). Характерного для силицитов опалового гало не наблюдается.

Суммарная концентрация глинистых минералов в породе близка к 6,2 %. В составе глинистой фракции выделяется две группы минералов. Первая представлена гидролизованными мелкими обломками слюды и хлоритов, а вторая – продуктами их выветривания, представленными каолинитом и смешанослойными образованиями на основе хлорита и набухающих компонентов (вермикулита (корренсит) и/или монтмориллонита (тосудит)), а также гидрослюда и монтмориллонита (ССО, глауконит). ССО – это смешанослойный минерал, состоящий из чередующихся друг с другом слоев, представленных гидрослюдой и монтмориллонитом. Количественное содержание глинистых минералов (%): каолинит – 0,8; хлорит – 1,3; корренсит и/или тосудит – 2,0; гидрослюда – 2,3 и смешанослойные образования (ССО) – 0,8.

Преобладающим минералом в составе глинистой фракции является корренсит (тосудит) – 26 % от суммы глин. На втором месте по вкладу в сумму глинистых минералов находятся хлорит и ССО (по 19 % каждый). Затем следуют каолинит и гидрослюда (по 18 % каждый). Корренсит и/или тосудит – также смешанослойные минералы, но в их состав входят чередующиеся слои хлорита и вермикулита (корренсит) или хлорита и монтмориллонита (тосудит). Так как только на основании данных рентгеноструктурного анализа эти смешанослойные минералы трудно различимы друг от

друга без дополнительных методов исследования, поэтому в таблице состава и соотношения глинистых минералов приводим названия обоих минералов (табл. 2, 3).

**Таблица 2.** Результаты определения валового минерального состава, %

**Table 2.** Results of determination of total mineral composition, %

Кварц Quartz	Микроклин Microcline	Альбит Albite	Сидерит Siderite	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Корренсит (тосудит) Corrensite (tosudite)	Гидрослюда Hydrous mica	ССО Mixed layer clay
81,0	6,0	5,0	0,8	0,8	1,3	2,0	2,3	0,8

**Таблица 3.** Соотношение минералов в глинистой части, %

**Table 3.** Ratio of minerals to clayed part, %

Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Корренсит (тосудит) Corrensite (tosudite)	Гидрослюда Hydrous mica	ССО Mixed layer clay
18,0	19,0	26,0	18,0	19,0

По данным петрографического анализа проб четко устанавливаются две разновидности горных пород. Первая – порода псаммитовой структуры – приурочена к верхней части разреза и отвечает четвертичным отложениям, вторая – пелито-псаммо-алевритовая – к нижним частям разреза и соответствует туртасской свите.

Первый тип диагностируется как рыхлая порода псаммитовой структуры с примесью глинистого материала, окружающего обломки псаммитовой фракции. Размер песчаной фракции 0,125–0,16 мм, пелитовой – 0,01–0,07 мм. Отмечаются обугленные растительные остатки и ксило-витреновые, а также фрагменты диатомовых водорослей.

Второй тип характеризуется как рыхлая порода пелито-псаммо-алевритовой структуры, плохо отсортированная, с размером преобладающей фракции 0,02–0,05 и 0,08–0,125 мм. Хорошо диагностируются многочисленные фрагменты диатомовых водорослей размером до 0,03–0,05 мм, составляющих 8–10 % от общей площади шлифа, а также с включениями коричневых битумоидов (рис. 4). Преобладающим в обломочной части является кварц, часто трещиноватый, с нормальным, реже с волнистым, погасанием. Из полевых шпатов в небольшом количестве встречены: чистый плагиоклаз, ортоклаз с вросками кварца и микроклин с нарушенной двойниковой структурой. Округлые обособления зеленоватого цвета с микроагрегатной поляризацией принадлежат ССО, встречены в количестве 2 %. Из аксессуарных минералов отмечены эпидот, циркон, апатит. Редко встречены обломки глинистых гидрослюдистых пород, рудный магнетит и сидерит.

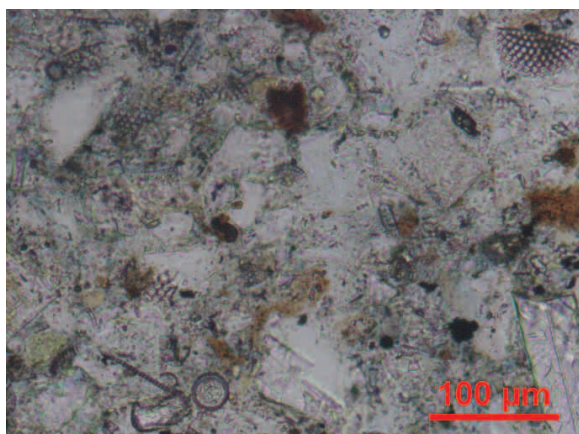


Рис. 4. Общий вид пелито-псаммо-алевритовой породы в шлифах

Fig. 4. General view of pelite-psamm-silt rock in slides

Микроскопический анализ показывает, что основная масса породы представлена обломками кварца, полевого шпата и плотными чешуйчатыми агрегатами глинистых минералов. Опаловый кремнезем слагает цельные панцири диатомей и их фрагменты размером до 30–50 мкм, которые прослеживаются повсеместно и хорошо сохранили строение раковины, и часто свободны от глинистой компоненты. Последнее позволяет диагностировать видовой состав диатомовых водорослей (рис. 5, 6).

В формировании породы принимают участие как пресноводные, так и типично морские диатомовые водоросли. Пресноводные планктонные *Aulacoseira* сочетаются с толстостенными морскими *Melosira*. Наиболее распространенными в исследованных породах являются диатомовые водоросли родов *Melosira*, *Paralia* и *Aulacoseira* (рис. 6).

Значительное содержание сложенных рентгеноаморфным опалом обломков диатомей (до 10 %) в сочетании со смешаннослойными образованиями, слагающими глинистую часть, должно обеспечивать активное взаимодействие со слабыми цепо-

чами. Последнее может быть определяющим критерием для широкого применения в производстве пеностеклянных материалов.

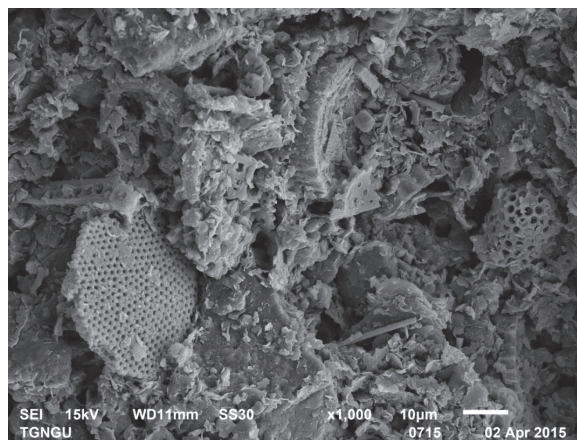


Рис. 5. Общий вид кремнистой породы под электронным микроскопом (фотографии: В.Т. Чернышев, ТюмГНГУ)

Fig. 5. General view of siliceous rock under electron microscope (photos by V.T. Chernyshev, Tyumen State Oil and Gas University)

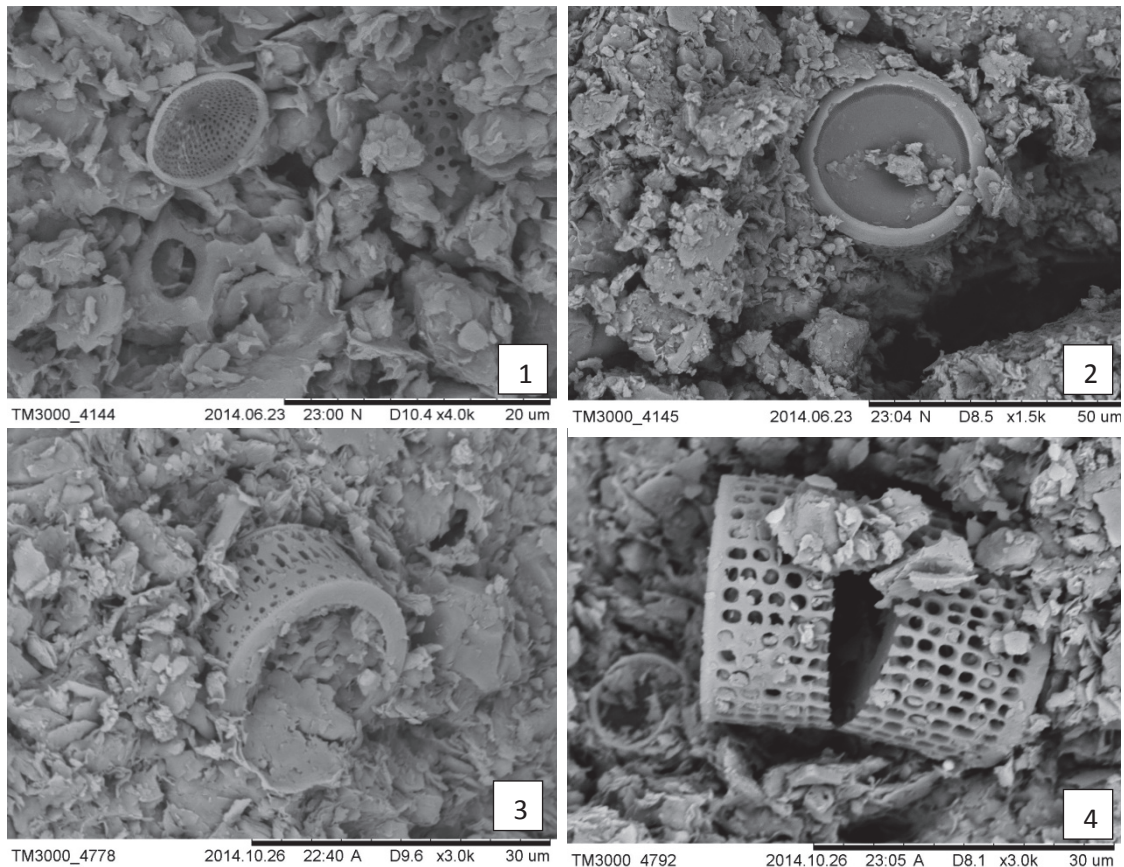
На базе Института Криосферы Земли СО РАН исследовалась возможность получения пеностеклокерамических материалов на основе рассматриваемого сырья. В соответствии с запатентованным способом (патент РФ № 2464251) [10] из проб породы были изготовлены и изучены образцы пеностеклокерамики, подвергнутые обжигу при 800 °С. Критериями оценки образцов служили: кратность вспенивания после обжига (отношение конечного объема образца к начальному) и средняя плотность.

Большая часть образцов (20 из 30 проб породы) показали высокую пригодность сырья (рис. 7). Кратность их вспенивания лежала в пределах 2,2–3,7, средняя плотность составляла 210–360 кг/м<sup>3</sup>. Структура полученного материала представлена на рис. 7. Остальная часть образцов имела недостаточные показатели, требуемые для получения качественных материалов: кратность вспенивания: 1,1–1,6 и среднюю плотность 490–800 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, даже в пределах одного горизонта имеет место высокая неоднородность горных пород, по всей видимости, обусловленная переслаиванием глинистого и песчаного материала. Очевидно, что более опесчаненные разности дают более низкую кратность вспенивания и высокую плотность.

С применением опытной установки для получения гранулированной пеностеклокерамики, из технологической пробы породы массой 250 кг была получена партия гранулированного пеностеклокерамического материала «Диатом ИК» (ТУ 5764–001–90903792–2013 [11]) (рис. 8). Материал фракции 2,5–10 мм имел следующие показатели качества:

1. Насыпная плотность 350 кг/м<sup>3</sup>.
2. Прочность при сжатии 1,9 МПа.
3. Водопоглощение по объему 2,8 %.



**Рис. 6.** Диатомовые водоросли в исследуемой породе: 1 – *Stellarima microtrias*; 2 – *Hyalodiscus*; 3 – *Paralia Sulcata* (Her.); 4 – *Aulacoseira* (фотографии: А.Н. Курчатова, Тюменский научный центр СО РАН; диагностика: Н.И. Афанасьева, ЦНИИГеолнеруд)

**Fig. 6.** Diatoms in the rock: 1 – *Stellarima microtrias*; 2 – *Hyalodiscus*; 3 – *Paralia Sulcata* (Her.); 4 – *Aulacoseira* (photos by A.N. Kurchatov, Tyumen Scientific Center SB RAS; diagnostics by N.I. Afanasyev, Central Research Institute for Geology of Industrial Minerals)

4. Коэффициент размягчения (отношение прочности при сжатии водонасыщенных гранул к сухим) 0,98.

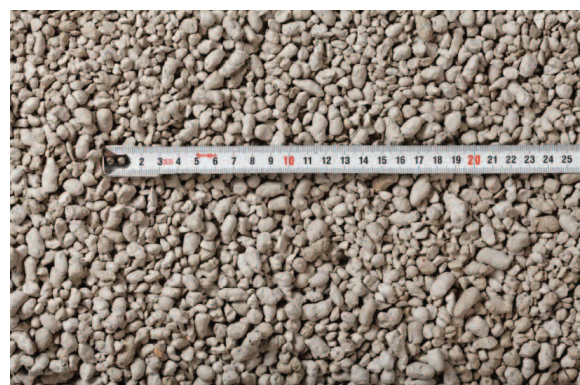
5. Теплопроводность 0,11 Вт/(м·К).

В целом данный вид сырья признан пригодным для производства пеностеклокерамических материалов.



**Рис. 7.** Образец, полученный при вспенивании исследованной породы

**Fig. 7.** Sample obtained when frothing the rock



**Рис. 8.** Гранулированный теплоизоляционный материал «ДиатомИК», изготовленный из технологической пробы исследованных пород

**Fig. 8.** Granular insulation «Diatomilk» made of process sample of the investigated rock

Гранулированный теплоизоляционный материал «ДиатомИК» обладает исключительным набором характеристик и может найти широкое применение в промышленно-гражданском, транспортном строительстве, в качестве заполнителя в конструктивно-теплоизоляционных бетонах, насып-

ной теплоизоляции и др. [12, 13]. Высокая водостойкость материала и сравнительно низкая теплопроводность позволяют применять его для термостабилизации оснований инженерных сооружений с целью снижения интенсивности растепления грунтов в районах с вечной мерзлотой, а также снижения негативного криогенного воздействия на сооружения в районах с сезонным промерзанием грунтов.

На сегодняшний день в Российской Федерации наблюдается значительный спрос на качественные теплоизоляционные материалы [14]. Сложные климатические условия большей части территории России и интенсивное развитие строительной отрасли предполагают активное внедрение высокотехнологичных материалов, которые позволили бы увеличить долговечность сооружений и снизить затраты на их эксплуатацию. Из представленных на рынке теплоизоляционных материалов только пеностекло обладает необходимым набором характеристик.

В странах СНГ пеностекло чаще всего применяется при строительстве инженерных сооружений с повышенным уровнем риска (объекты промышленности, энергетики), а также в сооружениях, для которых заявлен срок безремонтной эксплуатации более 50 лет. Повсеместное использование данного материала, несмотря на значительный спрос, лимитировано ограниченной сырьевой базой. Пеностекло, как правило, производится из промышленных и бытовых отходов стекла. Отсутствие отлаженной системы сбора, транспортировки и переработки стеклобоя ограничивает возможности для производства и применения пеностекла в РФ [15].

ДиатомИК по набору характеристик сопоставим с большинством отечественных и зарубежных марок пеностекла. Он может использоваться как местный строительный материал: заполнитель в конструкционно-теплоизоляционных бетонах, либо в качестве насыпной теплоизоляции.

В странах северной и центральной Европы ячеистые пеносиликатные материалы уже более 20 лет успешно применяются в транспортном строительстве [16]. Наибольшего успеха в применении материалов из пеностекла при строительстве дорог в сложных инженерно-геологических условиях достигли скандинавские страны: Финляндия, Швеция и в первую очередь Норвегия

[17, 18]. Начиная с 1999 г. гранулированное пеностекло применялось при строительстве и реконструкции более чем 25 дорожных объектов Норвегии, главным из которых является Транснорвежская магистраль Е6 [19].

Зарубежный опыт применения пеносиликатных материалов при строительстве автомобильных дорог в условиях криолитозоны прямо указывает на перспективность использования материала ДиатомИК при освоении нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири, модернизации транспортной инфраструктуры региона. Расширение сырьевой базы для производства материала ДиатомИК (в том числе, и на юге Тюменской области) повысит экономическую целесообразность использования материала для нужд многоэтажного и малоэтажного гражданского строительства, создаст все необходимые возможности для повышения доступности жилья в регионе, снижения затрат на его эксплуатацию.

### Заключение

Ранее геологи не видели перспектив расширения минерально-сырьевой базы кремнистых пород на юге Тюменской области. Однако полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что в южных районах Тюменской области, тяготеющих к его западной границе, имеются перспективы для расширения минеральной базы кремнистых пород Зауралья за счет отложений туртасской свиты верхнего олигоцена. Стоит обратить внимание на факт общего опесчанивания разреза свиты в западном направлении – к Исеть-Тавдинскому междуречью [20], как раз в зоне, где были проведены исследования. Поэтому есть основания полагать, что при изучении объектов туртасской свиты за пределами данной территории качество сырья будет выше, в первую очередь за счет большей однородности и меньшего содержания псаммитовой составляющей.

Вместе с тем в связи с близким расположением охраняемой лесной зоны и площадей сельскохозяйственного назначения разведка на запад и юг Успенской площади представляется невозможной. Поэтому дальнейшие перспективы изучения отложений туртасской свиты и возможного оконтуривания карьерной выработки связаны с территориями к северу от изученной площади.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов П.В., Иванов К.С. Предпосылки расширения минеральной базы кремнистых пород на юге Тюменской области // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна: Матер. IX Междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – С. 39–43.
2. Рубина Н.В. Палеоальгологическое обоснование стратиграфии морских и континентальных палеогеновых и неогеновых отложений Западно-Сибирской низменности // в кн.: Морской и континентальный палеоген Сибири. – Новосибирск: Наука, 1973. – С. 87–96.
3. Рубина Н.В. Комплексы диатомей в отложениях туртасской свиты Западно-Сибирской низменности // в кн. Ископаемые диатомовые водоросли СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 61–66.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист O-41 (Екатеринбург) ФГУП «ВСЕГЕИ», 2011.
5. Чанбаева Э.З. Оценка запасов подземных вод на участках действующих водозаборов ЗАО «Успенское» Тюменского района Тюменской области. – Тюмень: Тюменьгеомониторинг, 2013. – С. 145–150.
6. Соколкин С.Б. Оценка гидрогеологической изученности и подготовка геологического обоснования работ по государственной

- геологической карте масштаба 1:1000000 листа О-41. – Екатеринбург: Уралнедра, 2012. – 263 с.
7. Бакулин В.В., Козин В.В. География Тюменской области. – Екатеринбург: Средне-Уральское книжное издательство, 1996. – 240 с.
  8. Атлас Тюменской области. Вып. 1. – М.; Тюмень: Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1971. – 45 п.л.
  9. Каменских А.П. Оценка перспективности территории Нижнетавдинского района на титан-циркониевые россыпи. – Тюмень: ВП «Неоком и Ко», 1997. – 8 с.
  10. Способ получения ячеистого строительного материала: пат. 2464251 Рос. Федерация. МПК51 С04В 38/00, С04В 28/24, С04В 40/02, С04В 111/40. Оpubл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 3 с.
  11. ТУ 5764-001-90903792-2013 «Материал теплоизоляционный гранулированный универсальный «ДиатомИК». – Тюмень: ТИП-ИК-1, 2013. – 4 с.
  12. Иванов К.С. Новый изоляционный материал для термостабилизации грунтов // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV. – № 4. – С. 120–122.
  13. Иванов К.С., Радаев С.С., Селезнева О.И. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла // Стекло и керамика. – 2014. – № 5. – С. 15–19.
  14. Гусарова Л.Г., Комкова А.В. Некоторые аспекты маркетингового анализа инновационно-ориентированного производства пеностекла // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 10 (1). – С. 61.
  15. Мелкоян Р.Г., Власова С.Г. Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. – 100 с.
  16. Eriksson L., Hagglund J. Manual for Foam Glass in soil and road construction. – Linköping: The Swedish Geotechnical Institute, 2008. – 44 p.
  17. Emersleben A., Meyer N. Paved with Glass // Civil Engineering. – Clausthal-Zellerfeld: ASCE, 2012. – С. 441–451.
  18. Meyer M., Emersleben A. Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Altglas im Verkehrswegebau // Recycling und Rohstoffe. B. 3. – Berlin: Verlag, 2010. – С. 441–451.
  19. Frydenlund T.E., Aabø R. Use of waste materials for lightweight fills // International Workshop on Lightweight Geomaterials. – Tokyo, 2002.
  20. Астапов А.П., Дрожжих Н.Б., Генералова Р.С. Палеогеография палеогена и неогена юга Тюменской области в связи с оценкой перспектив территории на нерудное сырье. – Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1979. – 33 с.

Поступила 06.04.2015 г.

UDC 553.041; 553.69

## LITHOLOGY OF TURTASS SUITE ROCKS AND OPPORTUNITIES OF THEIR USE AS A RAW MATERIAL FOR FOAMGLASS CERAMICS ON THE EXAMPLE OF USPENSKAYA AREA (TYUMEN REGION)

**Pavel V. Smirnov,**

Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskogo street, Tyumen, 625000, Russia; Institute of the Earth Cryosphere SB RAS, 86, Malygina street, Tyumen, 625000, Russia. E-mail: geolog.08@mail.ru

**Konstantin S. Ivanov,**

Institute of the Earth Cryosphere SB RAS, 86, Malygina street, Tyumen, 625000, Russia. E-mail: sillicium@bk.ru

**Alexander O. Konstantinov,**

Institute of the Earth Cryosphere SB RAS, 86, Malygina street, Tyumen, 625000, Russia. E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

*Relevance of the discussed issue is caused by the necessity to expand the local mineral resource base of Tyumen region for producing a large range of modern building and insulating foamglass ceramics materials.*

*The main aim of the research is to study the chemical and mineral composition of sediments of Turtass suite of Upper Oligocene to determine the possibility of their use as raw material for producing building and insulating foamglass ceramics materials on the example of Uspenskaya area (Tyumen region).*

*The methods used in study: field investigations, reconnaissance of the area, macroscopic study, X-ray fluorescence analysis, X-ray analysis, petrographic analysis, electron microscopy, diatom analysis, technological tests in accordance with the RF patent № 2464251 and TC 5764-001-90903792-2013.*

*The results. The carried out investigations show that the significant content of frustules of diatoms and their fragments (10 %), formed by X-ray amorphous opal, combined with mixed layers of formation (corensite, tosudite etc.), which form the clay part, actively engage with weak alkalis and, consequently, define the opportunities for their wide use in production of foamglass ceramics materials. During the pilot testing the authors have obtained the samples of foamglass ceramics materials, which meet the RF patent no. 2464251 and TC 5764-001-90903792-2013 in part of bulk density, compressive strength, water absorption by volume, softening coefficient and thermal conductivity. Multifunctionality of the material allows planning the production of a wide range of products in demand in industrial, civil and low-rise wireframe, road construction, oil and gas industry, landscape design: building blocks, dry construction mixtures, fillers in concrete, foamglass ceramics blocks, bulk insulation for roads and grounds.*

### **Key words:**

*Siliceous rocks, silicites, turtass suite, foam glass, Tyumen region.*

## REFERENCES

1. Smirnov P.V., Ivanov K.S. Predposylki rasshireniya mineralnoy bazy kremniystykh porod na yuge Tyumenskoy oblasti [Prerequisites of extension of mineral base of siliceous rocks in the south of the Tyumen region]. *Geologiya i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskogo megabasseyina. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Geology and petroleum potential of the West Siberian megabasin. Proc. IX Int. scientific and engineering. conf.]. Tyumen, 2014. pp. 39–43.
2. Rubina N.V. Paleogeologicheskoe obosnovanie stratigrafii morskikh i kontinentalnykh paleogenovykh i neogenovykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Paleogeological justification of stratigraphy of marine and continental Paleogene and Neogene deposits of the West Siberian Plain]. *Morskoy i kontinentalnyy paleogen Sibiri* [Marine and continental paleogen of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973. pp. 87–96.
3. Rubina N.V. Kompleksy diatomey v otlozheniyakh turtasskoy svity Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Complexes of diatoms in Turtass Formation sediments of the West Siberian Plain]. *Iskopaemye diatomovye vodorosli SSSR* [Fossil diatoms of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1968. pp. 61–66.
4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Uralskaya. List O-41 (Ekaterinburg) [State geological map of the Russian Federation, the scale of 1:1 000 000 (third generation). Ural Series. Sheet G-41 (Yekaterinburg)]. Saint-Peterburg, FGUP «VSEGEI», 2011.
5. Chanbaeva E.Z. Otsenka zapasov podzemnykh vod na uchastkakh deystvuyushchikh vodozaborov ZAO «Uspenskoe» Tyumenskogo rayona Tyumenskoy oblasti [Assessment of groundwater resources in the areas of intake of «Uspensky» Tyumen district, Tyumen region]. Tyumen, Tyumengeomonitoring Publ., 2013. pp. 145–150.
6. Sokolkin S.B. Otsenka gidrogeologicheskoy izuchennosti i podgotovka geologicheskogo obosnovaniya rabot po gosudarstvennoy geologicheskoy karte masshtaba 1:1000000 lista O-41 [Evaluation of hydrogeological studies and preparation of geological study of works on the state geological map of 1:1,000,000 sheet O-41]. Yekaterinburg, Uralnedra Publ., 2012. 263 p.
7. Bakulin V.V., Kozin V.V. Geografiya Tyumenskoy oblasti [Geography of Tyumen region]. Ekaterinburg, Sredne-Uralskoe knizhnoe izdatelstvo, 1996. 240 p.
8. Atlas Tyumenskoy oblasti [Atlas of Tyumen region]. Moscow, Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii, Tyumen Main Office of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1971. 45 p.
9. Kamenskikh A.P. Otsenka perspektivnosti territorii Nizhnetavdinskogo rayona na titan-tsirkonievye rossypi [Estimation of promising areas of Nizhnetavdinsky district for titanium-zirconium placers]. Tyumen, VP «Neokom i Ko», 1997. 8 p.
10. Melnikov V.P., Ivanov K.S. Sposob polucheniya yacheistogo stroitel'nogo materiala [The method for producing foamed construction material]. Patent RF no. 2464251, 2012.
11. TU 5764-001-90903792-2013 Material teploizolyatsionny granulirovanny universalny «DiatomIK» [Universal granulated thermal insulating material «DiatomIK»]. Tyumen, TIP-IK-1, 2013. 4 p.
12. Ivanov K.S. Novy izolyatsionny material dlya termostabilizatsii gruntov [The new insulation material for thermal stabilization of soils]. *Kriosfera Zemli*, 2011, no. 4, pp. 120–122.
13. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. Diatomity v texnologii granulirovannogo penostekla [Diatomite granular foamed glass technology]. *Steklo i keramika*, 2014, no. 5, pp. 15–19.
14. Gusarova L.G., Komkova A.V. Nekotorye aspekty marketingovogo analiza innovatsionno-orientirovannogo proizvodstva penostekla [Some aspects of marketing analysis of innovation-oriented production of foamed glass]. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*, 2013, no. 10 (1), pp. 61.
15. Melkonyan R.G. Ekologicheskie i ekonomicheskie problemy ispolzovaniya stekloboya v proizvodstve stekla [Environmental and economic problems of using broken glass in glass production]. Ekaterinburg, UrFU Publ. House, 2013. 100 p.
16. Eriksson L., Hagglund J. *Manual for Foam Glass in soil and road construction*. Linköping, The Swedish Geotechnical Institute, 2008. 44 p.
17. Emersleben A., Meyer N. Paved with Glass. *Civil Engineering*. Clausthal-Zellerfeld, ASCE, 2012. pp. 441–451.
18. Meyer M., Emersleben A. Einsatzmöglichkeiten von recyceltem Altglas im Verkehrswegebau. *Recycling und Rohstoffe*. B. 3. Berlin, Verlag, 2010. pp. 441–451.
19. Frydenlund T.E., Aabø R. Use of waste materials for lightweight fills. *International Workshop on Lightweight Geomaterials*. Tokyo, 2002.
20. Astapov A.P., Drozhashchikh N.B., Generalova R.S. Paleogeografiya paleogena i neogena yuga Tyumenskoy oblasti v svyazi s otsenkoy perspektiv territorii na nerudnoe syre [Paleogeography of Paleogene and Neogene of South of the Tyumen region in connection with the assessment of the territory prospects for non-metallic materials]. Tyumen, ZapSibNIGNI, 1979. pp. 33.

Received: 06 April 2015.



УДК 661.715.7:661.716

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА АЛКИЛИРОВАНИЯ БЕНЗОЛА ПРОПИЛЕНОМ

**Чудинова Алена Анатольевна,**

аспирант кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики  
Института природных ресурсов Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 30. E-mail: alena-chudinova@mail.ru

**Нурмаканова Асем Еслямбековна,**

аспирант кафедры химической технологии топлива и химической  
кибернетики Института природных ресурсов Национального  
исследовательского Томского политехнического университета, Россия,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: asem.nurmakanova@yandex.ru

**Салищева Анастасия Александровна,**

магистрант кафедры химической технологии топлива и химической  
кибернетики Института природных ресурсов Национального  
исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: SalischevaAA@yandex.ru

**Ивашкина Елена Николаевна,**

д-р техн. наук, профессор кафедры химической технологии топлива  
и химической кибернетики Института природных ресурсов Национального  
исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: ivashkinaen@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена широким применением процессов алкилирования в промышленности и необходимостью создания адекватной по своей прогнозирующей способности математической модели, пригодной для решения технологических задач производства изопропилбензола в присутствии хлорида алюминия.

**Цель работы:** определение и исследование термодинамических и кинетических закономерностей процесса алкилирования бензола пропиленом в присутствии хлорида алюминия с использованием методов квантовой химии.

**Методы исследования:** электронно-структурный метод, основанный на теории функционала плотности (ТФП, DFT) на уровне V3LYP. Поиск переходных состояний реакций в присутствии кислот Льюиса был выполнен методом QST2 на уровне V3LYP/6-31++G(d,p) и LSDA/6-31++G(d,p).

**Результаты.** Определенные с использованием методов квантовой химии термодинамические параметры основных реакций, протекающих в процессе получения кумола, позволили выполнить сравнение двух конкурирующих реакций – алкилирования и трансалкилирования. В результате было определено, что первая реакция обладает наименьшей энергией активации (для реакции алкилирования бензола пропиленом 150,94 кДж/моль при значении предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса  $1,58 \cdot 10^5$ , для реакции трансалкилирования энергия активации и предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса равны 156,13 кДж/моль и  $5,34 \cdot 10^6$ , соответственно). Установленные закономерности легли в основу математической модели процесса алкилирования, которая позволяет прогнозировать качество получаемого алкилата в зависимости от режима проведения процесса в реакторе алкилирования. Погрешность расчетов по модели таких показателей, как выход целевого продукта изопропилбензола и побочных компонентов, определяющих качество продукта (n-пропилбензола, этилбензола, полиалкилбензолов), не превышает 7–10 %.

### **Ключевые слова:**

Бензол, пропилен, изопропилбензол, переходное состояние, энергетический профиль реакции.

### **Введение**

Изопропилбензол (ИПБ), или кумол, на сегодняшний день является одним из главных источников сырья для получения фенола и ацетона, которые, в свою очередь, необходимы для синтеза широкого ассортимента нефтехимической продукции: бисфенола А, поликарбоната, фенолформальдегидных смол и многих других. С ростом спроса на них растет и спрос на кумол, производство которого с 9 млн т в 2000 г. выросло до 12 млн т в 2011 г. и продолжает увеличиваться [1]. На долю России приходится 600 тыс. т в год [2]. Ежегодный

прирост производства фенола составляет 10 % [3], что, в свою очередь, увеличивает спрос на кумол, так как 90 % фенола получают кумольным методом [4]. Этот факт явился причиной необходимости наращивания мощностей производства кумола и интенсификации процесса алкилирования.

Кумол в основном получают алкилированием бензола пропиленом в присутствии кислотных катализаторов, как правило, кислот Льюиса. На западе преимущественно используется технология твердофазного алкилирования, в качестве катализатора используется фосфорная кислота на кизель-

гуре, запатентовано компанией UOP Co [5]. В последнее время широкое применение нашли трифторид бора на кизельгуре и цеолиты, за счет безопасности их использования. Несмотря на это, в России до сих пор для синтеза кумола широко применяют хлорид алюминия [6].

Применение хлорида алюминия обычно приводит к различным проблемам, таким как коррозия оборудования, вредное воздействие на окружающую среду [7]. Некоторые производители используют трифторид бора, но этот процесс менее контролируем, чем процесс с хлоридом алюминия, к тому же для него требуется более высокая температура и давление [8]. С 1965 г. для производства кумола представляет большой интерес кислотный цеолитный катализатор [9], но только не так давно он был промышленно реализован компаниями Dow, Mobil, CD Tech, UOP и Enichem [9–11]. Несмотря на это, нашедшие широкое применение из-за своей безопасности цеолитные катализаторы [11] легко подвергаются дезактивации, имеют короткий цикл регенерации и требуют высоких температур и давления. Также ведутся работы по созданию новых катализаторов – ионных жидкостей [12], которые сочетают в себе безопасное использование и менее жесткие условия проведения процесса.

Альтернативой получению кумола алкилированием бензола пропиленом является процесс гидроалкилирования бензола ацетоном. Процесс представляет особый интерес ввиду использования ацетона, спрос на который не возрастает аналогично росту спроса на фенол. Алкилирование проводится путем последовательного гидрирования ацетона до изопропанола с последующим алкилированием бензола полученным спиртом в присутствии бифункционального катализатора, совмещающего гидрирующую и алкилирующую функции. Однако такая многофункциональная каталитическая система способствует протеканию множества побочных реакций [13]. Данный процесс пока не нашел широкого промышленного применения, поэтому повышение эффективности классического метода синтеза кумола остается актуальной задачей, для решения которой удобным инструментом является математическое моделирование.

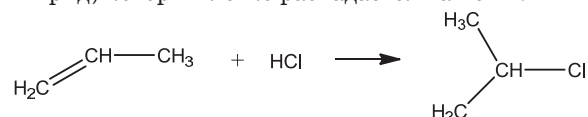
В последнее время все больше внимания уделяется моделированию многокомпонентных каталитических процессов химической и нефтехимической промышленности. Вместе с тем построение математической модели требует проведения большого объема экспериментальных исследований в лабораторных или промышленных условиях. Для их сокращения при сопоставлении различных химических схем синтеза следует использовать закономерности химической термодинамики. Термодинамическое моделирование дает информацию об энергетике процесса и составе продуктов реакции, позволяет качественно и количественно оценить возможность протекания реакций, определить оптимальные параметры процесса, обеспечивающие максимальный выход целевого продукта при минимальных затратах производства. Кроме того, такой

анализ позволяет сократить математическое описание процесса при составлении его модели [14].

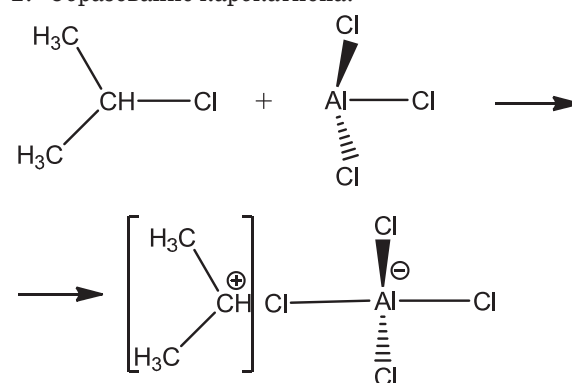
Реакция алкилирования бензола пропиленом осуществляется в присутствии кислот Льюиса. Известно, что алкилирование протекает через активирование олефина катализатором, после чего активированный комплекс реагирует с бензолом и алкилбензолами [15].

Предложенный в литературе механизм включает в себя четыре стадии:

1. Взаимодействие пропилена с хлороводородом, в результате которого образуется пропилахлорид, который легко распадается на ионы:

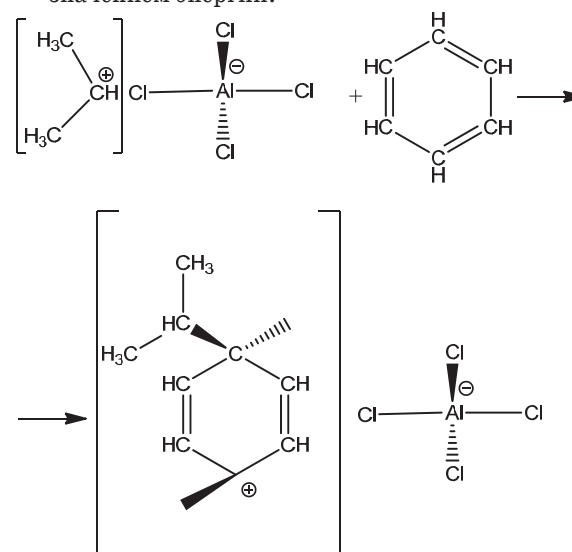


2. Образование карбкатиона:



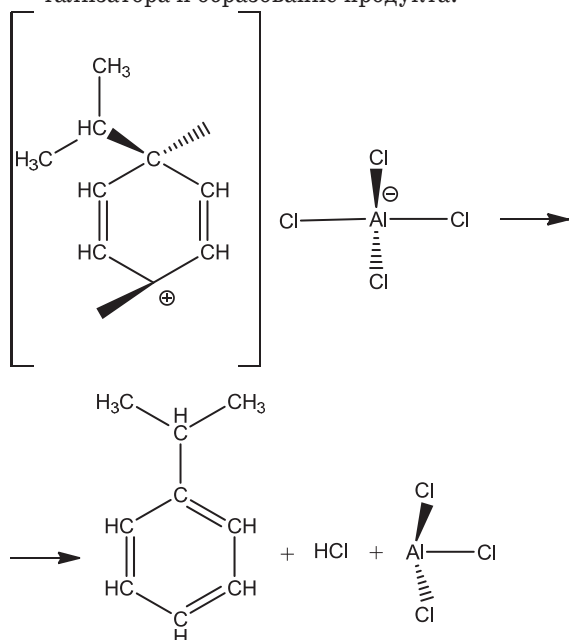
Образование поляризованных комплексов между галогенидом алюминия и алкилгалогенидом подтверждается наличием изотопного обмена между галогенидами алюминия, содержащего меченый галоген, и алкилгалогенидом [16].

3. На третьей стадии происходит электрофильная атака бензола карбкатионом, образуется интермедиат –  $\sigma$ -комплекс, обладающий высоким значением энергии:



Данная стадия является лимитирующей.

4. Последняя стадия включает в себя отщепление водорода от интермедиата, восстановление катализатора и образование продукта:



Целью данной работы является определение и исследование термодинамических и кинетических закономерностей процесса алкилирования бензола пропиленом в присутствии хлорида алюминия с использованием квантово-химических методов для построения математической модели, обладающей высоким прогностическим потенциалом.

#### Методы исследования

Численные исследования проведены с использованием метода теории функционала плотности (DFT) на уровне B3LYP. Этот метод был выбран в силу своей высокой точности по сравнению с эмпирическими методами, такими как PM3 [17]. Уровень B3LYP является наивысшим среди уровней DFT, а базисный набор был выбран таким образом, чтобы сохранить управляемость расчетов, но при этом не снизить точность описания физической ситуации. В результате был выбран базисный набор 6-31++G(d,p). Функции поляризации были необходимы начиная со стадии образования полярных молекул.

Базисные наборы с диффузными функциями используются для более точного описания анионов, а также систем с неподеленными электронными парами. Добавление этих функций позволяет более точно описывать поведение электронов на больших расстояниях от ядра.

Процессы, сопровождающиеся уменьшением числа неподеленных электронных пар, например процессы протонирования, также лучше моделировать с включением в базисный набор диффузных функций

Рассматриваемые реакции протекают в жидкой фазе, поэтому необходимо было учесть эффект

сольватации. Для этого была использована модель предельной поляризации Томаса (polarized continuum model C-PCM). Она определяет полость (или пространство) как комбинацию серии блокированных атомных сфер. В качестве растворителя был принят бензол, так как соотношение бензола к пропилену в промышленности поддерживается на уровне 3–10:1.

При поиске переходного состояния был использован метод квадратичного синхронного транзита, основанный на том, что на ППЭ (поверхность потенциальной энергии) можно провести семейство парабол, соединяющих точку реагента и точку продукта. Вершины этих парабол являются приближением к точке ПС. Если варьировать параметры парабол, минимизируя норму градиента (для этого требуется расчет энергии и градиента в точках, лежащих на параболах), процесс поиска может сойтись в точке истинного ПС [18].

При проведении расчетов были заданы условия протекания процесса алкилирования: температура – 395 К, давление – 1,6 атм., катализатор – AlCl<sub>3</sub>.

Энергия активации и предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса были определены, исходя из теории абсолютных скоростей химических реакций (теории переходного состояния):

1. Для расчета предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса использовано выражение (1):

$$k_0 = \chi \frac{kT}{h} e^{\frac{\Delta S_0^\ddagger}{R}}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент прохождения (трансмиссионный коэффициент);  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  – температура, К;  $h$  – постоянная Планка ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж/с),  $S_0^\ddagger$  – энтальпия активации, кДж/моль;  $R$  – газовая постоянная. Для бимолекулярной реакции (2):

$$k_0 = \chi \frac{k_b T}{h} e^{\frac{RT}{RT}} = \chi \frac{k_b T}{h} e. \quad (2)$$

2. Для расчета энергии активации (3):

$$E_a = \Delta H^\ddagger + nRT, \quad (3)$$

где  $\Delta H^\ddagger$  – энтальпия активации.

#### Результаты и их обсуждение

На первом этапе была проведена оптимизация всех продуктов и реагентов на каждой стадии для каждой из рассматриваемых реакций и выполнены расчеты частот колебаний, а также энтальпии, энергии Гиббса и энтропии основных реакций процесса алкилирования бензола пропиленом при условиях проведения его в промышленности. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены справочные термодинамические характеристики для реакций алкилирования, рассчитанных через характеристики ( $\Delta H_f^\circ$ ,  $S^\circ$ ,  $\Delta G_f^\circ$ ) отдельных углеводородов [19, 20].

**Таблица 1.** Рассчитанные термодинамические характеристики основных реакций процесса алкилирования бензола пропиленом ( $T=395\text{ K}$  и  $P=1,6\text{ атм.}$ )

**Table 1.** Calculated thermodynamic characteristics of the main reactions of benzene alkylation with propylene ( $T=395\text{ K}$  and  $P=1,6\text{ атм.}$ )

Реакция Reaction	$\Delta H$ , кДж/моль kJ/mole	$\Delta S$ , Дж/моль·К kJ/mole·K	$\Delta G$ , кДж/моль kJ/mole
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5CH(CH_3)_2$	-71,00	-167,17	-4,97
$C_6H_5CH(CH_3)_2 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2$	-70,39	-166,27	-4,71
$C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_6H_6 \rightarrow 2C_6H_5CH(CH_3)_2$	-0,62	-0,89	-0,26
$C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_3(CH(CH_3)_2)_3$	-8,21	-305,27	112,37
$C_6H_3(CH(CH_3)_2)_3 + C_6H_6 \rightarrow$ $\rightarrow C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_6H_5CH(CH_3)_2$	-62,79	138,10	-117,34
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5C_3H_7$	-73,12	-162,59	-8,90
$C_6H_5CH_3 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_4CH_2CH(CH_3)_2$	-70,35	-163,61	-5,73
$2C_3H_6 \rightarrow C_6H_{12}$	-77,33	-166,38	-11,61
$2C_2H_4 \rightarrow CH_2=CH-C_2H_5$	-93,54	-136,91	-39,46
$2C_2H_4 \rightarrow CH_3-CH=CH-CH_3$	-107,23	-157,22	-45,12
$2C_2H_4 \rightarrow CH_2=C(CH_3)_2$	-109,25	-142,66	-52,90
$C_6H_6 + CH_2=CH-C_2H_5 \rightarrow C_6H_5CH_2CH_2C_2H_5$	-67,98	-167,10	-1,98
$C_6H_6 + CH_2=C(CH_3)_2 \rightarrow C_6H_5C(CH_3)_3$	-48,13	-173,30	20,33
$C_6H_6 + CH_2=CH-C_2H_5 \rightarrow C_6H_5C_4H_9$	-74,28	-155,80	-12,74
$C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_5C_2H_5$	-87,76	-148,48	-29,11
$C_6H_5C_2H_5 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_4(C_2H_5)_2$	-87,10	-147,93	-28,66
$C_6H_4(C_2H_5)_2 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_3(C_2H_5)_3$	-75,16	-153,25	-14,63
$C_6H_6 + C_6H_3(C_2H_5)_3 \rightarrow C_6H_4(C_2H_5)_2 + C_6H_5C_2H_5$	-12,59	4,77	-14,48
$2C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5CH_3 + C_6H_4(CH_3)_2$	-93,63	203,51	-174,02
$2C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow 2C_6H_5CH_3$	-99,68	185,17	-172,82
$C_6H_6 + C_6H_4(C_2H_5)_2 \rightarrow 2C_6H_5C_2H_5$	-0,66	-0,55	-0,44

**Таблица 2.** Справочные термодинамические характеристики реакций ( $T=400\text{ K}$  и  $P=1\text{ атм.}$ )

**Table 2.** Reference thermodynamic characteristic of the reactions ( $T=400\text{ K}$  and  $P=1\text{ атм.}$ )

Реакция/Reaction	$\Delta H$ , кДж/моль kJ/mole	$\Delta S$ , Дж/моль·К kJ/mole·K	$\Delta G$ , кДж/моль kJ/mole
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5CH(CH_3)_2$	-98,65	-155,42	-21,21
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5C_3H_7$	-94,76	-133,35	-22,09
$2C_3H_6 \rightarrow C_6H_{12}$	-101,50	-151,78	-21,55
$C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_5C_2H_5$	-105,01	-127,15	-24,79
$2C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow 2C_6H_5CH_3$	-83,63	181,54	-155,34

Как видно, рассчитанные с применением методов квантовой химии значения термодинамических параметров реакций отличны от справочных данных. Это обусловлено тем, что в справочной литературе приводятся значения, характеризующие состояние идеального газа. Кроме того, для большинства углеводородов, таких как диизопропилбензол, триизопропилбензол и другие, термодинамические свойства в литературе не приводятся. Это вызвало необходимость определения термодинамических характеристик основных реакций процесса алкилирования с применением методов квантовой химии.

Список реакций был составлен на основе литературных данных, а также данных о компонентном составе входного и выходного потоков алкилятора, полученных по результатам мониторинга реакторного блока цеха получения изопропилбензола в присутствии хлорида алюминия на ОАО «Омский каучук» (табл. 3).

**Таблица 3.** Компонентный состав входного и выходного потоков алкилятора ПАО «Омский каучук»

**Table 3.** Fractional analysis of input and output flows of alkylation reactor at «Omsky kauchuk»

Компонент Component	Концентрация, мас. % Concentration, wt. %
Сырье/Raw materials	
Пропан-пропиленовая фракция/Propane-propylene fraction	
Пропан/Propane	2,03–11,00
Пропилен/Propylene	89–97,97
Осушенная бензолная шихта/Drained benzene burden	
Бензол/Benzene	60,29–87,41
изо-пропилбензол/iso-propyl benzene	1,11–9,43
Гексен/Hexene	1,67–3,98
Толуол/Toluene	0,02–2,13
Этилбензол/Ethyl benzene	0,1–1,56
Ксилол/Xylene	0,01–1,13
н-пропилбензол/n-propyl benzene	0,01–0,13
3-бутилбензол/3-butyl benzene	0,05–0,65
2-бутилбензол/2-butyl benzene	0,13–1,06
Цимол/Cymene	0,08–1,36
н-бутилбензол/n-butyl benzene	0,08–0,47
Полиалкилбензолы (ПАБ)/Polyalkylbenzene (PAB)	6,54–24,19
Продукт/Product	
Гексан/Hexane	0,84–3,15
Бензол/Benzene	40,94–57,81
Толуол/Toluene	0,38–3,80
Этилбензол/Ethyl benzene	0,08–1,32
изо-пропилбензол/iso-propyl benzene	26,27–39,00
н-пропилбензол/n-propyl benzene	0,05–0,15
3-бутилбензол/3-butyl benzene	0,05–0,44
2-бутилбензол/2-butyl benzene	0,10–0,65
Цимол/Cymene	0,15–0,75
н-бутилбензол/n-butyl benzene	0,08–0,32
ПАБ/PAB	6,84–18,07
Ксилол/Xylene	0,01–0,05
Остаток/Residue	2,00

Следующим этапом исследований стал поиск переходных состояний реакций алкилирования бензола пропиленом в присутствии кислот Льюиса методом QST2 на уровне B3LYP/6–31++G(d,p) и LSDA/6–31++G(d,p). Соответствие найденных структур переходным состояниям доказывалось наличием одного отрицательного собственного значения матрицы Гессе, соответствующего мнимому колебанию. Обычно переходное состояние характеризуется одним мнимым колебанием, относящимся к седловой точке первого порядка.

Для каждой из рассматриваемых реакций (табл. 1) были определены термодинамические параметры переходного состояния. Результаты расчетов данных параметров для реакции алкилирования бензола пропиленом приведены в табл. 4, 5.

**Таблица 4.** Термодинамические параметры каждой стадии реакции алкилирования бензола пропиленом при температуре 395 К и давлении 1,6 атм.

**Table 4.** Thermodynamic parameters of every stage of benzene alkylation with propylene at 395 K and pressure 1,6 atm.

Стадии реакции алкилирования бензола пропиленом Stages of benzene alkylation with propylene	$\Delta H$ , кДж/моль (kJ/mole)	$\Delta S$ , Дж/моль·К (kJ/mole·K)	$\Delta G$ , кДж/моль (kJ/mole)
1	-66,88	-145,68	-9,33
2	-51,21	-153,25	9,32
3	175,80	-265,86	280,82
4	-128,72	397,62	-285,78
Суммарное значение Total value	-71,00	-167,17	-4,97

**Таблица 5.** Энтальпия активации, энергия Гиббса активации, энтропия активации, кинетические параметры каждой стадии реакции алкилирования бензола пропиленом при температуре 395 К и давлении 1,6 атм.

**Table 5.** Activation enthalpy, Gibbs activation energy, activation entropy, kinetic parameters of every stage of benzene alkylation with propylene at 395 K and pressure 1,6 atm.

	$\Delta H^\ddagger$ , кДж/моль (kJ/mole)	$\Delta G^\ddagger$ , кДж/моль (kJ/mole)	$\Delta S^\ddagger$ , Дж/моль·К (kJ/mole·K)	Предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса $A_0$ Preexponential multiplier in Arrhenius's equation $A_0$	$E_a$ , кДж/моль (kJ/mole)	$K_{равн.}$ $K_{equal}$
$C_3H_6 + HCl$ TS <sub>1</sub>	98,96	149,78	-128,74	$2,06 \cdot 10^7$	102,24	$9,63 \cdot 10^{-1}$
$CH(CH_3)_2Cl + AlCl_3$ TS <sub>2</sub>	-28,74	33,04	-156,50	$1,28 \cdot 10^6$	25,45	$9,92 \cdot 10^{-1}$
$CH(CH_3)_2AlCl_4 + C_6H_6$ TS <sub>3</sub>	147,66	223,80	-177,35	$1,58 \cdot 10^5$	150,94	$9,45 \cdot 10^{-1}$
$C_9H_{13}AlCl_4$ TS <sub>4</sub>	95,76	119,99	-119,67	$5,11 \cdot 10^7$	99,04	$9,70 \cdot 10^{-1}$

Аналогично были определены термодинамические параметры переходного состояния реакций алкилирования изопропилбензола пропиленом, трансалкилирования бензола диизопропилбензолом, алкилирования диизопропилбензола пропиленом, трансалкилирования бензола триизопропилбензолом, алкилирования бензола пропиленом с образованием н-пропилбензола (НПБ), алкилирования толуола пропиленом, димеризации этилена и пропилена, алкилирования бензола бутиленом-1 и изобутиленом с образованием втор-бутил-

бензола и трет-бутилбензола соответственно и др. (табл. 1).

В результате проведенных численных исследований были определены термодинамические и кинетические закономерности процесса алкилирования бензола пропиленом в присутствии хлорида алюминия. Кинетические параметры основных реакций процесса приведены в табл. 6.

**Таблица 6.** Кинетические параметры реакций процесса алкилирования бензола пропиленом при температуре 395 К и давлении 1,6 атм.

**Table 6.** Kinetic parameters of reactions of benzene alkylation with propylene at 395 K and pressure 1,6 atm.

Реакция/Reaction	$A_0$ , с <sup>-1</sup> (s <sup>-1</sup> )	$E_a$ , кДж/моль (kJ/mole)	$k$ , с <sup>-1</sup> (s <sup>-1</sup> )
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5CH(CH_3)_2$	$1,58 \cdot 10^5$	150,94	$3,74 \cdot 10^{-12}$
$C_6H_5CH(CH_3)_2 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2$	$2,26 \cdot 10^5$	128,81	$1,47 \cdot 10^{-9}$
$C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_3H_6 \rightarrow 2C_6H_5CH(CH_3)_2$	$5,34 \cdot 10^4$	156,13	$3,39 \cdot 10^{-13}$
$C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_3(CH(CH_3)_2)_3$	$1,80 \cdot 10^4$	140,64	$5,81 \cdot 10^{-12}$
$C_6H_3(CH(CH_3)_2)_3 + C_6H_6 \rightarrow C_6H_4(CH(CH_3)_2)_2 + C_6H_5CH(CH_3)_2$	$1,01 \cdot 10^4$	154,71	$9,19 \cdot 10^{-14}$
$C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5C_3H_7$	$1,28 \cdot 10^5$	130,41	$5,53 \cdot 10^{-10}$
$C_6H_5CH_3 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_4CH_2CH(CH_3)_2$	$1,36 \cdot 10^5$	143,83	$1,95 \cdot 10^{-11}$
$2C_3H_6 \rightarrow C_6H_{12}$	$1,97 \cdot 10^5$	116,20	$6,68 \cdot 10^{-13}$
$2C_2H_4 \rightarrow CH_2=CH-C_2H_5$	$1,65 \cdot 10^6$	166,98	$7,64 \cdot 10^{-10}$
$2C_2H_4 \rightarrow CH_3-CH=CH-CH_3$	$2,92 \cdot 10^6$	141,47	$2,00 \cdot 10^{-9}$
$2C_2H_4 \rightarrow CH_2=C(CH_3)_2$	$3,95 \cdot 10^6$	138,86	$3,13 \cdot 10^{-9}$
$C_6H_6 + CH_2=CH-C_2H_5 \rightarrow C_6H_5CHCH_2C_2H_5$	$5,45 \cdot 10^6$	159,90	$1,33 \cdot 10^{-11}$
$C_6H_6 + CH_2=C(CH_3)_2 \rightarrow C_6H_5C(CH_3)_3$	$5,65 \cdot 10^5$	158,23	$2,11 \cdot 10^{-12}$
$C_6H_6 + CH_2=CH-C_2H_5 \rightarrow C_6H_5C_4H_9$	$1,42 \cdot 10^6$	147,95	$7,18 \cdot 10^{-11}$
$C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_5C_2H_5$	$7,16 \cdot 10^5$	137,4	$5,15 \cdot 10^{-10}$
$C_6H_5C_2H_5 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_4(C_2H_5)_2$	$2,90 \cdot 10^4$	129,58	$1,55 \cdot 10^{-10}$
$C_6H_4(C_2H_5)_2 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_3(C_2H_5)_3$	$3,51 \cdot 10^5$	177,98	$8,73 \cdot 10^{-15}$
$C_6H_6 + C_6H_5(C_2H_5)_3 \rightarrow C_6H_4(C_2H_5)_2 + C_6H_5C_2H_5$	$4,20 \cdot 10^4$	165,09	$2,75 \cdot 10^{-14}$
$2C_6H_6 + C_3H_6 \rightarrow C_6H_5CH_3 + C_6H_4(CH_3)_2$	$1,42 \cdot 10^6$	216,11	$2,23 \cdot 10^{-18}$
$2C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow 2C_6H_5CH_3$	$1,42 \cdot 10^6$	216,11	$2,23 \cdot 10^{-18}$
$C_6H_6 + C_6H_4(C_2H_5)_2 \rightarrow 2C_6H_5C_2H_5$	$3,23 \cdot 10^4$	238,27	$1,84 \cdot 10^{-22}$

Полученные значения кинетических параметров послужили основой для создания математической модели процесса, которая позволит прогнозировать качество получаемого алкилата в зависимости от состава сырья, температурного режима проведения процесса и времени контакта реагентов в реакторе.

Материальный баланс алкилятора имеет вид:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{\tau} (C_{вх} - C_{вых}) \pm w_i \quad (4)$$

Здесь  $C_i$  – концентрация  $i$ -го вещества, моль/м<sup>3</sup>;  $w_i$  – скорость реакций по  $i$ -му веществу, моль/м<sup>3</sup>.

Такое уравнение (4) записывается по каждому из компонентов, участвующих в реакции.

Суммарное выражение для скорости реакции образования и расхода изопропилбензола согласно закону действующих масс имеет следующий вид:

$$\frac{dC_{ИПБ}}{d\tau} = k_1 \cdot C_{бензол} \cdot C_{пропилен} - k_{-1} \cdot C_{ИПБ} - k_2 \cdot C_{ИПБ} \cdot C_{пропилен} + k_{-2} \cdot C_{ПАБ} + 2 \cdot k_3 \cdot C_{бензол} \cdot C_{ПАБ} - 2 \cdot k_{-3} \cdot C_{ИПБ}^2 + k_4 \cdot C_{бензол} \cdot C_{ПАБ} - k_{-4} \cdot C_{ИПБ} \cdot C_{ПАБ}.$$

Здесь  $k_i$  и  $k_{-i}$  – константа скорости прямой и обратной реакции, соответствующей реакции из списка;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го компонента, моль/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время контакта реагентов, с; ПАБ – диизопропилбензол, триизопропилбензол, диэтилбензол, триэтилбензол.

Для проверки полученной модели на адекватность было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных с действующей установки алкилирования ПАО «Омский каучук», работающей в режиме нормальной эксплуатации (табл. 7).

В табл. 7  $\Delta$  – погрешность расчета, %. Ее значение не превышает 10 %, что позволяет использовать модель для различных технологических расчетов, например прогнозирования качества получаемого продукта, основными показателями которого являются концентрация  $n$ -пропилбензола (НПБ) и этилбензола (ЭБ) в кумоле.

Для продукции 1 сорта содержание этих компонентов должно быть не более 0,05 мас. %, для продукции 2 сорта – 0,20 и 0,15 мас. %, соответственно.

Для достижения высокой селективности процесса (концентрация ИПБ 99,9 мас. %) выход полиалкилбензолов (ПАБ) должен составлять 7–10 % от объема продуктовой смеси (не более 1500 кг/ч при выходе кумола 6000 кг/ч).

Расчеты на модели позволили количественно оценить зависимость содержания ИПБ и ПАБ в продукте от температуры в реакторе алкилирования (рисунок).

С повышением температуры в реакторе выход целевого компонента незначительно снижается. Это связано с процессом деалкилирования, для которого необходимы более высокие температуры, по

сравнению с алкилированием. Вместе с тем при повышении температуры содержание ПАБ снижается, т. к. при достижении высоких значений температуры протекают реакции трансалкилирования.

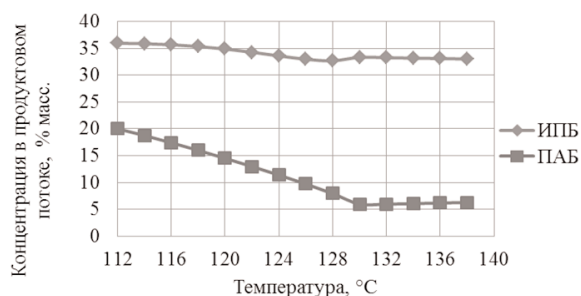


Рисунок. Зависимость содержания ИПБ и ПАБ в продукте от температуры в реакторе алкилирования

Figure. Dependence of IPB and PAB content in the product on temperature in alkylation reactor

### Выводы

- Полученные на основе квантово-химического моделирования с использованием метода теории функционала плотности (DFT) значения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса активации позволили определить кинетические параметры каждой стадии реакции алкилирования бензола пропиленом, значения которых подтвердили то, что лимитирующей стадией суммарного механизма является стадия трансалкилирования.
- В результате сравнения кинетических параметров, определенных с применением методов квантовой химии для двух конкурирующих реакций – алкилирования и трансалкилирования, было определено, что первая обладает наименьшей энергией активации (150,94 кДж/моль при значении предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса  $1,58 \cdot 10^5$ ), для реакции трансалкилирования энергия активации и предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса равны 156,13 кДж/моль и  $5,34 \cdot 10^4$ , соответственно). Следовательно, наи-

Таблица 7. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по выходу основных компонентов процесса алкилирования

Table 7. Results of comparison of design and experimental data by the yield of the alkylation principle components

Дата Date	Выход ИПБ, кг/ч Yield of IPB, kg/h		$\Delta$ , %	Выход НПБ, % мас. Yield of NPB, wt. %		$\Delta$ , %	Выход ПАБ, кг/ч Yield of PAB, kg/h		$\Delta$ , %	Выход ЭБ, мас. % Yield of EB, wt. %		$\Delta$ , %
	Расч. Design	Эксп. Exp.		Расч. Design	Эксп. Exp.		Расч. Design	Эксп. Exp.		Расч. Design	Эксп. Exp.	
15.03.2013	5774,0	5398,7	<b>6,5</b>	0,09	0,084	<b>7,45</b>	1752,0	1642,5	<b>6,25</b>	1,65	1,78	<b>8,47</b>
15.04.2013	5003,1	4683,9	<b>6,38</b>	0,09	0,084	<b>7,33</b>	1162,8	1091,5	<b>6,13</b>	0,5	0,509	<b>1,8</b>
15.05.2013	5419,6	5134,5	<b>5,26</b>	0,07	0,066	<b>6,21</b>	1698,3	1613,2	<b>5,01</b>	0,54	0,55	<b>1,85</b>
15.06.2013	5848,2	5544,1	<b>5,2</b>	0,07	0,066	<b>6,15</b>	2190,7	2082,3	<b>4,95</b>	0,34	0,32	<b>5,88</b>
15.07.2013	6281,2	6026,8	<b>4,05</b>	0,07	0,067	<b>5</b>	2165,8	2083,5	<b>3,8</b>	0,31	0,34	<b>6,67</b>
15.08.2013	5408,0	5056,5	<b>6,5</b>	0,12	0,112	<b>7,45</b>	1582,0	1483,1	<b>6,25</b>	0,56	0,6	<b>7,14</b>
15.09.2013	5704,2	5339,1	<b>6,4</b>	0,09	0,084	<b>7,35</b>	2270,8	2131,2	<b>6,15</b>	0,67	0,677	<b>1,04</b>
15.10.2013	6985,0	6558,9	<b>6,1</b>	0,05	0,047	<b>7,05</b>	2563,0	2413,1	<b>5,85</b>	0,54	0,55	<b>1,88</b>
15.11.2013	6186,6	5853,8	<b>5,38</b>	0,08	0,075	<b>6,33</b>	2173,5	2062,0	<b>5,13</b>	0,78	0,72	<b>7,69</b>

больший вклад в суммарный выход целевого продукта – изопропилбензола – вносят вторичные реакции трансалкилирования образовавшихся на предыдущих стадиях ди- и триизопрропилбензолов.

- Установленные термодинамические и кинетические закономерности процесса алкилирования бензола пропиленом использованы для создания математической модели, пригодной для

прогнозирования качественных показателей получаемого алкилата в зависимости от технологического режима проведения процесса алкилирования. Погрешность расчетов по модели таких показателей, как выход целевого продукта изопропилбензола и побочных компонентов, определяющих качество продукта (н-пропилбензола, этилбензола, полиалкилбензолов), не превышает 7–10 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Booming Petrochemical Industry Assures Cumene Sales to Grow by 4 % / ed. by Stephan D. // Process Worldwide. URL: [http://www.process-worldwide.com/management/markets\\_industries/articles/393591/](http://www.process-worldwide.com/management/markets_industries/articles/393591/) (дата обращения: 02.06.2013).
- Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. 1 / под общ. ред. Ю.В. Поконовой, В.И. Стархова – СПб.: АНО НПО «Мир и семья», АНО НПО «Профессионал», 2002. – 988 с.
- Закошанский В.М. Альтернативные технологии получения фенола // Российский химический журнал. – 2008. – Т. III. – № 4. – С. 53–71.
- Ананьева Е.А., Егорова Е.В., Ларин Л.В. Современное состояние и перспективы развития процессов получения фенола. I. Обзор рынка и современное состояние процессов получения фенола // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. 2. – № 2. – С. 27–43.
- Алкилирование бензола: пат. США № 2382318; заявл. 08.04.1942; опубл. 14.08.1945. – 4 с.
- Гайле А.А., Сомов В.Е., Варшавский О.М. Ароматические углеводороды: Выделение, применение, рынок: справочник. – СПб.: Химиздат, 2000. – 544 с.
- Degnan T.F., Smith C.M., Venkat C.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes // Applied catalysis. A, General. – 2001. – № 1–2. – P. 283–294.
- Paolucci Ch. Ab Initio catalyst comparison for ethylbenzene synthesis from alkylation. – USA: University of Notre Dame, 2012. – 18 p.
- Alkylation of benzene catalysed by supported heteropolyacids / D.A. Alberto, A. Stefano, B. Donatella, M. Luciano, P. Carlo // J. Mol Catal. A: Chem. – 1999. – V. 146. – Iss. 1–2. – P. 37–44.
- Liquid-phase alkylation of benzene with light olefins catalyzed by  $\beta$ -zeolites / G. Bellussi, G. Pazzuconi, C. Perego, G. Girotti, G. Terzoni // J. Catal. – 1995. – V. 157 (1). – P. 227–234.
- Experimental and computational study of beta, ZSM-12, Y, mordenite and ERB-1 in cumene synthesis / C. Perego, S. Amarilli, R. Millini, G. Bellussi, G. Girotti, G. Terzoni // Microporous Mater. – 1996. – V. 6. – Iss. 5–6. – P. 395–404.
- Sun Xuewen, Zhao Suoqi. Alkylation of Benzene with Propylene Catalyzed by Ionic Liquids // Petroleum Science. – 2006. – V. 3. – № 3. – P. 60–64.
- Шуткина О.В. Гидроалкилирование бензола ацетоном на бифункциональных катализаторах: дис. ... канд. хим. наук. – М., 2014. – 116 с.
- Формализация схемы превращений углеводородов в процессе дегидрирования высших алканов  $C_9-C_{14}$  на поверхности платиновых катализаторов / Е.В. Францина, Ю.И. Афанасьева, Е.Н. Ивашкина, А.А. Функ, А.В. Кравцов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 3. – С. 85–89.
- Алкилирование. Исследования и промышленное оформление процесса / пер. с англ. под ред. Л.Ф. Олбрайта, А.Р. Голдсби. – М.: Химия, 1982. – 336 с.
- Сайкс П. Механизмы реакций в органической химии. 4-е изд. – М.: Химия, 1991. – 448 с.
- Полещук О.Х., Кижнер Д.М. Химические исследования методами расчета электронной структуры молекул. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 145 с.
- Игнатов С.К. Квантово-химическое моделирование молекулярной структуры, физико-химических свойств и реакционной способности. Ч. 2. Оптимизация молекулярной геометрии и расчет физико-химических свойств. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2011. – 79 с. URL: <http://www.unn.ru/chem/ignatov/IgnatovSK-QC-2-2011.pdf> (дата обращения: 23.11.2014).
- Краткий справочник физико-химических величин. 7-е изд. / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
- Сталл Д., Вестрам Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений. – М.: Мир, 1971. – 806 с.

Поступила 26.11.2014 г.

UDC 661.715.7:661.716

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF BENZENE ALKYLATION WITH PROPYLENE

**Alena A. Chudinova,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: alena-chudinova@mail.ru

**Asem E. Nurmakanova,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: asem.nurmakanova@yandex.ru

**Anastasiya A. Salishcheva,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: SalishchevaAA@yandex.ru

**Elena N. Ivashkina,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ivashkinaen@tpu.ru

**Relevance** of the research is caused by broad application of alkylation in industry and the necessity to develop a mathematical model adequate on the predicting ability and suitable for solving the technological problems in producing cumene with aluminum chloride.

**The main aim** of the research is to define and to study the thermodynamic and kinetic regularities of benzene alkylation with propylene in the presence of aluminum chloride applying the methods of quantum chemistry.

**The methods used in the study:** electronic-structural method based on density functional theory (DFT, DFT) at B3LYP. Search for transition state of the reaction in the presence of Lewis acids was performed by QST2 at B3LYP / 6-31 ++ G(d,p) and LSDA / 6-31 ++ G(d,p).

**The results.** The thermodynamic parameters of the main reactions, defined by the methods of quantum chemistry, proceeding in the course of obtaining cumene, allowed comparing two competing reactions – alkylation and transalkylation. As a result it was ascertained that the first reaction possesses the lowest activation energy (for benzene alkylation with propylene it is 150,94 kJ/mol at preexponential multiplier value in Arrhenius's  $1,58 \cdot 10^5$  equation, for transalkylation reaction the activation energy and a preexponential multiplier in Arrhenius's equation equal 156,13 kJ/mol and  $5,34 \cdot 10^4$ , respectively). The regularities determined became the basis of the mathematical model of the alkylation process that allows predicting the quality of the alkylate depending on the process mode in the alkylation reactor. Accuracy of calculations by the model of such indicators as the yield of main and secondary components that determine the quality of the product (n-propylbenzene, ethylbenzene, polyalkylbenzenes) does not exceed 7–10 %.

### Key words:

Benzene, propylene, cumene, transition state, energy profile of reaction.

### REFERENCES

1. Stephen D. Booming Petrochemical Industry Assures Cumene Sales to Grow by 4 %. *Process Worldwide*. Available at: [http://www.process-worldwide.com/management/markets\\_industries/articles/393591/](http://www.process-worldwide.com/management/markets_industries/articles/393591/) (accessed 02 June 2013).
2. *Novy spravochnik khimika i tekhnologa. Syre i produkty promyshlennosti organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv* [New reference book of chemist and technologist. Raw materials and industrial products of organic and inorganic substances]. Eds. Yu.V. Pokonova, V.I. Starkhova. St-Petersburg, Professional Publ., 2002. P. 1, 988 p.
3. Zakoshansky V.M. Alternativnye tekhnologii polucheniya fenola [Alternative techniques of obtaining phenol]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. 3, no. 4, pp. 53–71.
4. Ananieva E.A., Egorova E.V., Larin L.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya protsessov polucheniya fenola. Obzor rynka i sovremennoe sostoyanie protsessov polucheniya fenola [Current state and prospects of development of phenol production. Market review and current state of phenol production]. *Vestnik MIKTT*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 27–43.
5. *Alkylation of benzene*. US Patence Appl., US 2382318, 1945.
6. Gaile A.A., Somov V.E. *Aromaticcheskie uglevodorody: vydelenie, primenenie, rynek. Spravochnik* [Aromatic hydrocarbons: extraction, application, market. Reference book]. St-Petersburg, Khimizdat Publ., 2000. 544 p.
7. Degnan T.F., Smith C.M., Venkat C.R. Alkylation of aromatics with ethylene and propylene: recent developments in commercial processes. *Applied catalysis, General*, 2001, no. 1–2, pp. 283–294.
8. Paolucci Ch. *Ab Initio catalyst comparison for ethylbenzene synthesis from alkylation*. USA, University of Notre Dame, 2012, 18 p.
9. Alberto D.A., Stefano A., Donatella B., Luciano M., Carlo P. Alkylation of benzene catalysed by supported heteropolyacids. *J. Mol. Catal. A: Chem*, 1999, vol. 146, Iss. 1–2, pp. 37–44.
10. Bellussi G., Pazzuconi G., Perego C., Girotti G., Terzoni G. Liquid-phase alkylation of benzene with light olefins catalyzed by  $\beta$ -zeolites. *J. Catal.*, 1995, vol. 157 (1), pp. 227–234.
11. Perego C., Amarilli S., Millini R., Bellussi G., Girotti G., Terzoni G. Experimental and computational study of beta, ZSM-12, Y, morde-nite and ERB-1 in cumene synthesis. *Microporous Mater.*, 1996, vol. 6, Iss. 5–6, pp. 395–404.
12. Sun Xuewen, Zhao Suoqi. Alkylation of Benzene with Propylene Catalyzed by Ionic Liquids. *Petroleum Science*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 60–64.
13. Shutkina O.V. *Gidroalkilirovanie benzola atsetonom na bifunktsionalnykh katalizatorakh. Dis. Kand. nauk* [Benzene hydroalkylation with acetone on bifunctional catalyst. Cand. Diss.]. Moscow, 2014. 116 p.
14. Frantsina E.V., Afanasieva Yu.I., Ivashkina E.N., Funk A.A., Kravtsov A.V. Formalizatsiya skhemy prevrashcheniy uglevodod-



- rodov v protsesse degidirovaniya vysshikh alkanov C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub> na poverkhnosti platinovykh katalizatorov [Formalization of the scheme of hydrocarbon transformation at dehydration of higher alkanes C<sub>9</sub>-C<sub>14</sub> on platinum catalyst surface]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 3, pp. 85-89.
15. Alkilirovanie. *Issledovaniya i promyshlennoe oformlenie protsesa* [Alkylation. Investigation and industrial execution of the process]. Eds. and translation from English L.F. Olbrayt, A.R. Goldsbi. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 336 p.
  16. Sayks P. *Mekhanizmy reaktsii v organicheskoy khimii* [Reaction mechanisms in organic chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 448 p.
  17. Poleshchuk O.Kh., Kizher D.M. *Khimicheskie issledovaniya metodami rascheta elektronnoy struktury molekul* [Chemical studies by the methods of calculation of a molecule electron structure]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 145 p.
  18. Ignatov S.K. *Kvantovo-khimicheskoe modelirovanie molekulyarnoy struktury, fiziko-khimicheskikh svoystv i reaktsionnoy sposobnosti. Ch. 2. Optimizatsiya molekulyarnoy geometrii i raschet fiziko-khimicheskikh svoystv* [Quantum chemical modeling of molecular structure, physicochemical features and reactivity. P. 2. Optimization of molecular geometry and calculation of physicochemical features]. Nizhny Novgorod, N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 2011. 79 p. Available at: <http://www.unn.ru/chem/ignatov/IgnatovSK-QC-2-2011.pdf> (accessed 23 November 2014).
  19. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Breif reference book of physicochemical values]. Eds. K.P. Mishchenko, A.A. Ravdel. Leningrad, Khimiya Publ., 1974. 200 p.
  20. Stall D., Vestram E., Zinke G. *Chimicheskaya termodinamica organicheskikh soedineniy* [Chemical thermodynamics of organic compounds]. Moscow, Mir Publ., 1971. 806 p.

Received: 26 November 2014.

УДК 621.182.002(571.16)(092)

## ВКЛАД НАУЧНОЙ ШКОЛЫ АКАДЕМИКА В.Е. НАКОРЯКОВА В ТЕПЛОФИЗИКУ И ТЕПЛОТЕХНИКУ

### Заворин Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, E-mail: zavorin@tpu.ru

### Кузнецов Гений Владимирович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, E-mail: marisha@tpu.ru

*Актуальность работы связана с 80-летием со дня рождения академика Владимира Елиферьевича Накорякова и определяется его ролью в развитии фундаментальных основ теплофизику, теоретической теплотехники и их инженерных приложений в различных отраслях промышленности.*

**Цель работы:** провести систематизацию наиболее значимых работ и публикаций В.Е. Накорякова и его сотрудников по основным направлениям исследований, выделить главные результаты, полученные им совместно с учениками, показать их значение для науки.

**Результаты.** Составлен обзор научных достижений академика В.Е. Накорякова и созданной им научной школы в области теплофизику и теплотехники. Показано значение работ в области нестационарного теплообмена. Впервые им получены расчетные зависимости для тел классической формы при теплообмене в звуковом поле в условиях свободной конвекции и вынужденного течения, для горения капли в звуковом поле камер сгорания. На основе экспериментальных результатов даны теоретические объяснения ряда теплофизических эффектов в камерах сгорания, показана их связь с локальной концентрацией тепловых потоков, что позволило повысить надежность реактивных двигателей. Внесен весомый вклад в экспериментальную термодинамику многофазных систем. Разработана теория электродиффузионного метода диагностики однофазных и многофазных сред. Осуществлена экспериментальная реализация метода, которая позволила решить широкий класс задач гидродинамики и массообмена двухфазных течений, впервые провести измерения профиля скорости жидкой фазы и газосодержания, измерить турбулентные характеристики газожидкостных потоков. Исследования процессов в двухфазных средах привели к созданию теории волновой динамики газожидкостных систем.

**Выводы.** В качестве заключения приведены сведения о признании заслуг В.Е. Накорякова научной общественностью, академическими и общественными сферами.

### Ключевые слова:

Научная школа, теплофизика, теплотехника, тепломассообмен, эксперимент, методы измерения, двухфазный поток.

### Введение. Академик Накоряков В.Е. – основатель научной школы

Путь в науку Владимира Елиферьевича Накорякова начинался после окончания в 1958 г. теплоэнергетического факультета Томского политехнического института. В студенческие годы среди его учителей были профессора: И.Н. Бутаков – основатель теплотехнической научной школы в Сибири, Г.И. Фукс – создатель метода эксергетического анализа процессов в энергетических установках, И.К. Лебедев – организатор сибирской научно-образовательной школы котлоостроения. Сформировался как ученый В.Е. Накоряков в Институте теплофизику Сибирского отделения Академии наук СССР под руководством академика С.С. Кутателадзе, где в короткий срок прошел этапы роста от молодого научного сотрудника до доктора наук, заведующего отделом, заместителя директора института.

Широчайший круг научных интересов, глубокая эрудиция, новаторские подходы к исследованию решаемых проблем принесли Владимиру Елиферьевичу известность и признание научного сообщества как ученого и крупного организатора в нау-

ке. В начале восьмидесятых годов прошлого века он был избран членом-корреспондентом, а в 1986 г. стал действительным членом АН СССР и директором академического Института теплофизику имени С.С. Кутателадзе.

Много внимания и энергии В.Е. Накоряков уделяет работе по подготовке научных кадров. В период с 1983 по 1985 гг. он ректор Новосибирского государственного университета, затем заместитель председателя Сибирского отделения РАН. Он организовал кафедру тепловых электрических станций в Новосибирском государственном техническом университете, содействовал созданию в Томском политехническом университете кафедры водородной энергетики и является ее действующим профессором.

Одним из впечатляющих результатов многогранной деятельности академика А.Е. Накорякова является создание научной школы – среди его учеников более 50 докторов наук и 250 кандидатов наук. Совместно с ними получен ряд фундаментальных результатов, имеющих огромное значение для развития не только технологий энергетики, но и многих других отраслей техники.

**Общая теория горения пленок и капель жидкости, частиц угля в звуковом поле [1–3, 5 и др.]**

Еще в кандидатской диссертации «Тепломассообмен в звуковом поле» В.Е. Накоряков впервые получил результаты, ставшие развитием работ Дж. Рэлея «Теория звука» и Г. Шлихтинга «Теория пограничного слоя» по вторичным акустическим течениям. Впоследствии на этой основе им была построена общая теория горения пленок и капель жидкости, частиц угля в звуковом поле. По этому научному направлению опубликованы монографии «Кинетика горения ископаемых топлив», (Новосибирск, 1963); «Тепло- и массообмен в звуковом поле» (Новосибирск, 1970).

Результаты исследования влияния стоячей звуковой волны на теплообмен при вынужденном течении защищены в докторской диссертации «Тепломассообмен в осциллирующих и пульсирующих потоках». Основные теоретические следствия, полученные по этому научному направлению, использовались при анализе режимов работы двигателей при вибрационных режимах горения. Разработана теория горения пористого углерода при вынужденном обтекании, учитывающая внутрислойное горение. Этот цикл исследований был продолжением начатых в работах Д.А. Франк-Каменецкого, Я.Б. Зельдовича, В.А. Шваба, Б. Сполдинга фундаментальных исследований.

**Методы измерения скорости и трения в однофазных и двухфазных потоках [2–4, 6–17, 20–31 и др.]**

По результатам анализа и обобщения большого цикла исследований В.Е. Накоряков разработал метод измерения скорости и трения в однофазных и двухфазных потоках. Практически одновременно с Т. Ханратти, который впервые показал возможность измерения трения и пульсаций трения в квазистационарных режимах, им была построена теория измерения напряжений трения и спектра этой величины вплоть до частот 1000–1500 Гц. Выполнена серия экспериментов, подтвердивших большие возможности этого метода. Также в этот период времени разработан метод измерения скорости с использованием игольчатых датчиков диаметром до 50 мкм.

Впервые этот метод использовался для детального исследования турбулентных характеристик однофазных и газожидкостных потоков. Он успешно применяется с 1968 г. и до настоящего времени в ряде лабораторий мира, особенно в Сибирском отделении РАН, а также в нескольких лабораториях во Франции (Лион, Гренобль).

**Исследование структуры циркуляционных течений [7, 17–19, 27 и др.]**

Большой цикл работ выполнен под руководством В.Е. Накорякова по исследованию структуры однофазных циркуляционных течений.

Проведено математическое моделирование процессов переноса отрывных течений в турбулентной области смещения. Исследовалось течение в пря-

моугольных траншеях. Построена теория тепло-массообмена в траншеях на основе использования теоремы Сквайера. Метод, который используются в настоящее время, расширен на разработку теории тепло- и массообмена в трубах и каналах с регулярной шероховатостью. Обнаружены вихри Гертлера в траншеях прямоугольной формы, оказывающие существенное влияние на процессы переноса. Такой подход в обобщенном виде использовался для анализа процессов тепло-массообмена в зернистых упаковках при движении через них жидкости. Разработана теория тепло-массообмена при течении жидкости в каналах, заполненных шарами. К этому циклу работ примыкают исследования течений Хил-Шоу с обтеканием цилиндра при больших скоростях и струйных течений с образованием замкнутых циркуляционных зон. Основанный на этом подход применен для анализа русловых речных потоков при турбулентных течениях.

В экспериментальных исследованиях использовались электрохимический и лазер-доплеровский методы измерения. По результатам экспериментов выделены новые физические явления, названные квазитурбулентными. Данному циклу исследований посвящено более 20 работ.

**Теоретические и экспериментальные исследования двухфазных потоков [4, 7, 8, 10, 13, 16, 20–43 и др.]**

Возможно, наибольшее внимание в своих исследованиях В.Е. Накоряков уделял двухфазным потокам. Самым детальным образом им изучен вертикальный пузырьково-снарядный режим течения газожидкостной смеси с использованием электрохимического метода. Исследовались подъемные и опускающие течения. Обнаружены особенности в спектрах турбулентных пульсаций, взаимных корреляций, радикально отличающихся от этих характеристик в однофазных потоках. Изучено трение и пульсация трения на стенках. Такой же цикл работ выполнен для горизонтальных двухфазных потоков.

Эти экспериментальные и теоретические исследования проводились параллельно с работами профессора Г. Хьюита (Англия) и Жан-Марка де Лои (Франция).

Созданные при этом модели и методы решения задач крайне важны для обеспечения надежного функционирования каналов ядерных реакторов. В последнее время их роль возрастает в связи с переходом на мини- и микроканалы в теплоэнергетике, водородной энергетике, радиоэлектронике и ряде химических технологий. Этому направлению исследований посвящено около 100 работ и 3 монографии В.Е. Накорякова.

**Исследования пленочных течений [3, 9 и др.]**

Ряд фундаментальных результатов получены при исследовании пленочных течений жидкостей.

В 1944 г. академик П.Л. Капица выполнил основополагающую работу по волновому стеканию пленки по вертикальной стене. Им получено ура-

вление движения пленки и проведены базовые экспериментальные исследования. В работах В.Е. Накорякова и соавторов показано, что результаты экспериментов П.Л. Капицы описываются эволюционными уравнениями с решениями в виде уединенных волн, переходящих в трехмерные.

Выполнен большой цикл экспериментальных и теоретических работ как по гидродинамике, так и по тепломассообмену пленочных течений. Опубликовано более 100 статей по этой тематике. Учениками В.Е. Накорякова по проблеме теплопереноса в движущихся пленках защищено более 15 докторских диссертаций, опубликовано около 100 статей и монография «Волновая динамика в газо- и парожидкостной среде» (на русском и английском языках), переиздаваемая до настоящего времени. Полученные для такого течения решения активно использовались затем в работах Т. Бенжамина, С. Лина, А. Даклера, В.Я. Шкадова, Т. Ханратти, Г. Бэнкова. В их работах показана возможность использования теории пленочных течений при создании конденсаторов электростанций, градирен, дистилляционных и ректификационных колонн и других технических систем.

**Теоретические и экспериментальные исследования ударно-волновых процессов в газожидкостных средах [11, 14, 15, 23, 26, 28–34, 36, 37, 42, 44–50, 52–54 и др.]**

Многие годы В.Е. Накоряков посвятил решению задач нелинейной акустики и ударных волн в газожидкостных средах.

Им впервые показано, что нелинейные волновые процессы в пузырьковых системах описываются уравнениями Картевьёга-де Вриза-Бюргерса. Проведен подробный численный анализ на основе этих уравнений. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по эволюции слабых ударных волн в такой среде.

С использованием разработанной теории он описал появление системы солитонов волновых пакетов. Созданный математический аппарат оказался прекрасной средой для моделирования процессов с дисперсией и диссипацией. Работа выполнялась параллельно с исследованиями профессоров Л. Вингардена, С.В. Иорданского и В.К. Кедринского. Впервые в мире были получены уравнения такого типа для сред с фазовыми переходами. Проведены эксперименты по распространению ударных волн в жидкости, находящейся при температуре насыщения с пузырьками пара. Важность этих работ по волновым процессам с фазовыми переходами и растворением газа начала осознаваться только в последнее время. К этому циклу относятся исследования, выполненные вместе с академиками Я.Б. Зельдовичем, С.С. Кутателадзе, И.И. Новиковым и братьями Анатолием и Александром Борисовыми по обнаружению ударных волн разрежения вблизи критической точки. Проведен уникальный эксперимент по подтверждению реального существования ударных волн раз-

режения. Зарегистрировано открытие за № 321. Результаты опубликованы в монографии «Волновая динамика в газо- и парожидкостной среде», которая неоднократно переиздавалась в России и США.

Результаты этих исследований использовались при расчетах газожидкостных сопел двигателей и подводных звуковых каналов. В последнее время основное внимание автора теории было сосредоточено на исследовании волновых процессов в пористых средах с пузырьками газа. Эти исследования имеют принципиально важное значение для геофизики поиска нефти в условиях сильного искажения сигнала при наличии газовых пузырьков или фазовых переходов.

Рассматривая основные приложения этих результатов В.Е. Накорякова, можно также отметить, что в энергетике при уменьшении размеров парогенераторов и соответствующем уменьшении размеров каналов конструкторы идут на увеличение скорости потока, что приводит к проявлению эффекта сжимаемости. Во многих случаях расчет циркуляции становится невозможным без анализа волновых явлений неустойчивости. Возникает необходимость построения теории тепломассообмена в сжимаемых средах с дисперсией диссипации в энергетических установках всех типов. Важность исследований в этой области возросла в последнее время многократно. Одним из их частных результатов стала возможность получения газогидратов натурального газа на основе ударно-волнового воздействия. Полученный результат будет иметь громадное применение в ближайшем будущем при транспорте натурального газа.

**Физические и теоретические основы водородной энергетики [51, 55–60 и др.]**

Водородной энергетике посвящены работы В.Е. Накорякова последних нескольких лет. Им построена теория топливного элемента на протонной мембране, где учтены диффузионные процессы и влияние стефановского потока на тепломассообмен в пористой среде на основе подхода Б. Сполдинга и Я.Б. Зельдовича. Эти работы интенсивно развиваются, создается водородный генератор по схеме микроканалов, и выполняются экспериментальные исследования на топливных элементах с протонными мембранами. Получены патенты на новые типы топливных элементов.

В настоящие годы под руководством В.Е. Накорякова проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов, возникающих при инжектировании криогенной жидкости в воду. Актуальность задачи обусловлена возможностью использования результатов исследования для получения газогидратов, основанного на ударно-волновом способе. Инжектирование жидкого азота осуществлялось с использованием специально разработанного устройства. Установлено, что амплитуды развивающихся в таком процессе скачков давления находятся в диапазоне от 1,4 до 5,3 МПа, а

давление зависит от изменения различных условий инжектирования (температура рабочей среды, объем свободной поверхности и др.). Проведена визуализация процесса с помощью высокоскоростной видеосъемки. Полученные в ходе работы скачки давления могут оказаться достаточными для возможного образования газогидратов при применении жидкого азота в качестве инжектируемой криогенной жидкости.

#### Исследования теплообмена при интенсивном нагреве капель [58–60 и др.]

В последние годы под руководством В.Е. Накорякова выполнен большой цикл работ по разработкам методики измерения мгновенных скоростей десорбции капель и определения концентрации солей (LiBr, NaCl, CaCl<sub>2</sub>) для нестационарных процессов в диапазоне массовой концентрации соли 0–0,6.

Изучен теплообмен капель в диапазоне 3–250 °С в интервале толщин стенки 1–40 мм и класса шероховатости стенки 6–12, а также при использовании материалов с различной теплопроводностью. Исследованы режимы кипения капли при неустойчивой контактной линии и быстром изменении площади смачивающей поверхности капли.

Исследован также кризис кипения капель воды в диапазоне диаметров капель 3–20 мм. Изучена неизотермическая десорбция водно-солевых растворов капель на нагретой стенке и в миканалах при наличии кризиса кипения. Также исследованы различные режимы кипения растворов со-

ли LiBr в миканалах с диаметром от 2 до 10 мм с целью определения наиболее интенсивного режима десорбции.

Проведены экспериментальные исследования капель водно-спиртовых смесей для определения перегрева стенки и концентрации компонентов смеси, при которых реализуется максимальный критический тепловой поток.

Установлены основные закономерности процессов диссоциации гидратов метана и «самоконсервации» при отрицательных температурах в широком диапазоне тепловых потоков 65–1300 Вт/м<sup>2</sup> и диаметров гранул 2–10 мм.

#### Признание заслуг

Накоряков В.Е. – лауреат ряда престижных премий и государственных наград. За исследования и их результаты в области волновой динамики двухфазных систем ему присуждена Государственная премия СССР, за цикл работ по нестационарным тепловым и гидродинамическим процессам в однофазных средах – Государственная премия РСФСР. Он отмечен премиями Правительства РФ, Премией имени академика Лыкова, является одним из первых лауреатов премии «Глобальная энергия», награжден высокими правительственными наградами: орденами «За заслуги перед Отечеством» IV степени, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», Орденом Дружбы и медалями.

Томский политехнический университет с признательностью отмечает вклад своего выпускника в развитие науки и образования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурдуков А.П., Накоряков В.Е. О переносе массы в звуковом поле // Прикладная механика и техническая физика. – 1965. – № 2. – С. 62–66.
- Бурдуков А.П., Накоряков В.Е. Влияние колебаний на массоотдачу от сферы при больших числах Прандтля // Прикладная механика и техническая физика. – 1967. – № 3. – С. 158–160.
- Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Волны на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. – 1973. – № 2. – С. 109–113.
- Накоряков В.Е., Борисов А.А. Распространение возмущений в среде с релаксацией или химической реакцией // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12. – № 3. – С. 414–422.
- Бурдуков А.П., Валукина Н.В., Накоряков В.Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса // Прикладная механика и техническая физика. – 1975. – № 4. – С. 137–141.
- Propagation of perturbations in a gas-liquid mixture / V.V. Kuznetsov, V.E. Nakoryakov, G. Pokusaev, I.R. Shreiber // Journal of Fluid Mechanics. – 1978. – V. 85. – P. 85–96.
- Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Troyan E.N. Impingement of an axisymmetric liquid jet on a barrier // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1978. – V. 21. – P. 1175–1184.
- Гасенко В.Г., Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Нелинейные волны в жидкости с пузырьками газа // Акустический журнал. – 1979. – Т. 25. – № 5. – С. 681–685.
- Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волнообразование при тении пленки жидкости на вертикальной стенке // Прикладная механика и техническая физика. – 1979. – Т. 20. – № 6. – С. 77–87.
- Гасенко В.Г., Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Двухволновая модель распространения возмущений в жидкости с пузырьками газа // Прикладная механика и техническая физика. – 1979. – № 6. – С. 119–127.
- Экспериментальное обнаружение ударной волны разрежения вблизи критической точки жидкость–пар / С.С. Кутателадзе, А.А. Борисов, А.А. Борисов, В.Е. Накоряков // Доклады Академии наук. – 1980. – Т. 252. – № 3. – С. 595–598.
- Жак В.Д., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Трехмерные вихревые структуры в кавернах // Прикладная механика и техническая физика. – 1981. – № 2. – С. 54–59.
- Local characteristics of upward gas-liquid flows / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.P. Burdukov, V.P. Odnorol // International Journal of Multiphase Flow. – 1981. – V. 7. – № 1. – P. 63–81.
- Rarefaction shock wave near the critical liquid-vapor point / A.A. Borisov, A.I. Borisov, S.S. Kutateladze, V.E. Nakoryakov // Journal of Fluid Mechanics. – 1983. – V. 126. – P. 59–73.
- Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е. Ударные волны умеренной интенсивности в двухфазной среде // Акустический журнал. – 1985. – № 2. – С. 193–196.
- Конденсация пара на наклонной пластине, помещенной в пористую среду / В.А. Мухин, В.Е. Накоряков, П.Т. Петрик, Г.С. Сердаков // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 5. – С. 85–90.
- Распространение затопленной струи в узкой щели / В.Д. Жак, В.А. Мухин, В.Е. Накоряков, С.А. Сафонов // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 3. – С. 69–77.
- Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical

- pipe // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1986. – V. 12. – № 3. – P. 337–355.
19. Эволюция волн давления умеренной интенсивности в жидкости с пузырьками газа / В.Е. Донцов, В.Е. Кузнецов, П.Г. Марков, В.Е. Накоряков // *Акустический журнал*. – 1987. – Т. 33. – № 6. – С. 1041–1044.
  20. Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Исследование опускного пузырькового течения в вертикальной трубе // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1987. – Т. 28. – № 1. – С. 69–73.
  21. Донцов В.Е., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е. Распространение волн давления в пористой среде, насыщенной жидкостью // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1988. – № 1. – С. 120–130.
  22. The wave dynamics of a vapour-liquid medium / V.E. Nakoryakov, V.G. Pokusaev, I.R. Shreiber, N.A. Pribaturin // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1988. – V. 14. – № 6. – P. 655–677.
  23. Горелик Р.С., Кашинский О.Н., Накоряков В.Е. Теплообмен от стенки к восходящему пузырьковому течению при малых скоростях жидкой фазы // *Теплофизика высоких температур*. – 1989. – Т. 27. – № 2. – С. 300–305.
  24. Распространение волн давления в жидкости с пузырьками газа разных размеров / В.Е. Донцов, В.Е. Кузнецов, П.Г. Марков, В.Е. Накоряков // *Акустический журнал*. – 1989. – Т. 35. – № 1. – С. 157–159.
  25. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.V. Petukhov, R.S. Gorelik // *Experiments in Fluids*. – 1989. – V. 7. – № 8. – P. 560–566.
  26. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E. Pressure waves in saturated porous media // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1989. – V. 15. – № 6. – P. 857–875.
  27. Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles / V.E. Nakoryakov, V.V. Kuznetsov, V.E. Dontsov, P.G. Markov // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1990. – V. 16. – № 5. – P. 741–749.
  28. Natural convection in a hele-shaw cell / S.S. Vorontsov, A.V. Gorin, V.Ye. Nakoryakov, A.G. Khoruzhenko, V.M. Chupin // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1991. – V. 34. – № 3. – P. 703–709.
  29. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V. Experimental investigation of upward gas-liquid flow in a vertical narrow annulus // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1992. – V. 18. – № 3. – P. 313–326.
  30. Накоряков В.Е., Ячницкова Н.Н. Ламинарная струя в «узкой» щели при больших числах Рейнольдса // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1985. – № 5. – С. 30–35.
  31. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave formation on vertical falling liquid films // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1985. – Т. 11. – № 5. – P. 607–627.
  32. Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры / В.Е. Накоряков, Е.С. Вассерман, Б.Г. Покусаев, Н.А. Прибатурин // *Теплофизика высоких температур*. – 1994. – Т. 32. – № 3. – С. 411–417.
  33. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *Multiphase flow 1995: proceedings of the 2<sup>nd</sup> International conference on Multiphase Flow*. – Kyoto, Japan, April 3–7, 1995. – V. 1. – P. 11–17.
  34. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волны давления в суспензии жидкости с твердыми частицами и газовыми пузырьками // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1995. – № 1. – С. 32–40.
  35. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1995. – V. 38. – № 11. – P. 2127–2134.
  36. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № 3. – P. 417–429.
  37. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – V. 22. – № S1. – P. 116–120.
  38. Накоряков В.Е., Кузнецов В.В. Капиллярные явления, тепло-массообмен и волновые процессы при двухфазном течении в пористых системах и засыпках // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1997. – Т. 38. – № 4. – С. 155–166.
  39. In memoriam – Professor Michael Adol'fovich Styrikovich (1902–1995) / V.E. Nakoryakov, A.I. Leontiev, I.L. Mostinskiy, J.P. Hartnett // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1997. – V. 40. – № 3. – P. 503–504.
  40. Alexander I. Leontiev on his 70<sup>th</sup> birthday / V.E. Nakoryakov, S.V. Alekseenko, N.V. Medvetskaya, I.L. Mostinski, M.I. Osipov, E.P. Volchkov, Ju.A., Zeigavnik J.P. Hartnett // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1998. – V. 41. – № 1. – P. 1–2.
  41. Естественная конвекция от цилиндра в узкой щели и пористой среде / А.В. Горин, А.Ю. Егоров, В.Е. Накоряков, В.М. Чупин // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1999. – Т. 40. – № 1. – P. 140–150.
  42. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Распространение ударных волн в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками растворимого газа // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2000. – Т. 41. – № 5 (243). – С. 91–102.
  43. Григорьева Н.И., Накоряков В.Е. Моделирование тепло- и массопереноса при абсорбции в бинарных двухфазных системах, используемых в тепловых насосах // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2001. – Т. 42. – № 1 (245). – С. 115–123.
  44. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2001. – V. 27. – № 12. – P. 2023–2041.
  45. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Pressure-wave damping in a liquid with bubbles produced by two kinds of gases // *Doklady Physics*. – 2002. – V. 47. – № 2. – P. 153–155.
  46. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Эволюция волн давления в жидкости с пузырьками двух разных газов // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2002. – Т. 43. – № 2 (252). – С. 110–115.
  47. Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Волны давления в газожидкостной среде с расслоенной структурой жидкость – пузырьковая смесь // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2003. – Т. 44. – № 4 (260). – С. 102–108.
  48. Теплоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора / В.Е. Накоряков, Н.С. Буфетов, Н.И. Григорьева, Р.А. Дехтярь // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2003. – Т. 44. – № 2 (258). – С. 101–108.
  49. Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Экспериментальное исследование влияния малых добавок пав на неизотермическую абсорбцию // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2004. – Т. 45. – № 2 (264). – С. 156–161.
  50. Vapor absorption by immobile solution layer / V.E. Nakoryakov, N.S. Bufetov, N.I. Grigoryeva, R.A. Dekhtyar, I.V. Marchuk // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – V. 47. – № 6–7. – P. 1525–1533.
  51. The effect of surfactants on absorption under conditions of heat pumps and refrigerators / V.E. Nakoryakov, N.S. Bufetov, N.I. Grigoryeva, R.A. Dekhtyar // *International Journal of Low Carbon Technologies*. – 2006. – V. 1. – № 3. – P. 273–284.
  52. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Чернов А.А. Ударные волны в воде с пузырьками фреона-12 с образованием гидрата газа // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2007. – Т. 48. – № 3 (283). – С. 58–75.

53. Heat and mass transfer intensification at steam absorption by surfactant additives / V.E. Nakoryakov, N.I. Grigoryeva, N.S. Bufetov, R.A. Dekhtyar // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – № 21–22. – P. 5175–5181.
54. Накоряков В.Е., Гасенко В.Г. Математическая модель катодного узла топливного элемента с твердым электролитом // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2005. – Т. 46. – № 5 (273). – С. 27–37.
55. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Донцов Е.В. Процессы гидратообразования и растворения за ударной волной в жидкости с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2009. – Т. 50. – № 2 (294). – С. 178–187.
56. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bartashevich M.V. Heat and mass transfer in the entrance region of the falling film: absorption, desorption, condensation and evaporation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2011. – V. 54. – № 21–22. – P. 4485–4490.
57. Nakoryakov V.E., Misyura S.Ya., Elistratov S.L. The behavior of water droplets on the heated surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – V. 55. – № 23–24. – P. 6609–6617.
58. Nakoryakov V.E., Bartashevich M.V., Ostapenko V.V. Heat and mass transfer in the liquid film on a vertical wall in roll-wave regime // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – V. 55. – № 23–24. – P. 6514–6518.
59. Lezhnin S.I., Nakoryakov V.E. Growth of vapor bubbles from the solution with one volatile component at surface desorption // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – V. 55. – № 5–6. – P. 1433–1440.
60. Экспериментальные исследования процесса инжекции жидкого азота в воду / В.Е. Накоряков, А.Н. Цой, И.В. Мезенцев, А.В. Мелешкин // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2014. – Т. 21. – № 3. – С. 293–298.

Поступила 24.06.2015 г.

UDC 621.182.002(571.16)(092)

## CONTRIBUTION OF THE SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN V.E. NAKORYAKOV IN THERMOPHYSICS AND HEAT ENGINEERING

**Alexander S. Zavorin,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: zavorin@tpu.ru

**Geniy V. Kuznetsov,**

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: marisha@tpu.ru

*Relevance of the work is related to the 80<sup>th</sup> anniversary of the birth of Academician Vladimir El. Nakoryakov. The relevance is defined as well by his role in development of fundamentals of thermal physics, theoretical heat engineering and engineering applications in various industries.*

**The aim** of the work is to systematize the most significant works of Vladimir El. Nakoryakov and his colleagues in the main areas of research, to identify the main results obtained by him together with his disciples, to show their importance for science.

**Results.** The authors have made a review of scientific achievements of Academician Vladimir El. Nakoryakov and scientific school in the field of thermal physics and heat engineering established by him. The paper demonstrates the importance of the works in the field of unsteady heat transfer. For the first time he obtained the rated dependences for bodies with classical form at heat transfer in the audio field in the conditions of free convection and forced flow, for burning a drop in the sound field under free convection and forced flow for drop combustion in the sound field of combustion chambers. Based on the experimental results the theoretical explanations of a number of thermal effects in the combustion chambers was given, their relation to the local concentration of heat flows was shown, thus improving the reliability of jet engines. Vladimir El. Nakoryakov contributed significantly to the experimental thermodynamics of multiphase systems and developed the theory of electrodiffusion diagnostic method of single-phase and multiphase fluids. The method was experimentally implemented that allowed solving a wide class of problems of hydrodynamics and mass transfer of two-phase flows. For the first time it was possible to measure the velocity profile of the liquid phase and gas content, the turbulent characteristics of gas-liquid flows. The research of processes in two-phase media led to the development of the theory of wave dynamics of gas-liquid systems.

**Conclusions.** In conclusion the paper introduces the information on recognition of merits of V.E. Nakoryakov by scientific community, academia and public spheres.

### Key words:

*Scientific school, thermal physics, heat engineering, heat and mass transfer, experiment, methods of measurement, two-phase flow.*

### REFERENCES

1. Burdukov A.P., Nakoryakov V.E. O perenose massy v zvukovom pole [On mass transfer in an acoustic field]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1965, vol. 2, pp. 62–66.
2. Burdukov A.P., Nakoryakov V.E. Vliyaniye kolebaniy na massootdachu ot sfery pri bolshikh chislakh Prandtl'ya [Influence of oscillations on mass transfer from sphere at large Prandtl numbers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1967, no. 3, pp. 158–160.
3. Nakoryakov V.E., Shreiber I.R. Volny na poverkhnosti tonkogo sloya vyazkoy zhidkosti [Waves on the surface of a thin layer of viscous liquid]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1973, no. 2, pp. 109–113.

4. Nakoryakov V.E., Borisov A.A. rasprostranenie vozmushcheniy v srede s relaksatsiyey ili khimicheskoy reaktivnoy [Propagation of disturbances in a relaxing or chemically reacting medium]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1976, vol. 12, no. 3, pp. 414–422.
5. Burdukov A.P., Valukina N.V., Nakoryakov V.E. Osobennosti techeniya gazozhidkostnoy puzyrkovoy smesi pri malykh chislakh Reynoldsa [Peculiarities of gas-liquid bubble mixture at low Reynolds numbers]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1975, no. 4, p. 137–141.
6. Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev G., Shreiber I.R. Propagation of perturbations in a gas-liquid mixture. *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, vol. 85, pp. 85–96.
7. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Troyan E.N. Impingement of an axisymmetric liquid jet on a barrier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1978, vol. 21, pp. 1175–1184.
8. Gasenko V.G., Nakoryakov V.E., Shreiber I.R. Nelineynye volny v zhidkosti s puzyrkami gaza [Nonlinear perturbations in liquid with gas bubbles]. *Akustichesky zhurnal*, 1979, vol. 25, no. 5, pp. 681–685.
9. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Volnoobrazovanie pri techenii plenki zhidkosti na vertikalnoy stenke [Wave formation in liquid film flow on a vertical wall]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1979, vol. 20, no. 6, pp. 77–87.
10. Gasenko V.G., Nakoryakov V.E., Shreyber I.R. Dvukhvolnovaya model rasprostraneniya vozmushcheniy v zhidkosti s puzyrkami gaza [Two-wave model of propagation of disturbances in liquid with gas bubbles]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1979, no. 6, pp. 119–127.
11. Kutateladze S.S., Borisov A.A., Borisov A.A., Nakoryakov V.E. Eksperimentalnoe obnaruzhenie udarnoy volny razrezheniya vblizi kriticheskoy tochki zhidkost–par [Experimental detection of a rarefaction shock wave near a liquid–vapor critical point]. *Soviet Physics. Doklady*, 1980, vol. 252, no. 3, pp. 595–598.
12. Jak V.D., Mukhin V.A., Nakoryakov V.E. Trekhmernyye vikhriyye struktury v kavernakh [Three dimensional vortex structures in cavities]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1981, no. 2, p. 54–59.
13. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P., Odnoral V.P. Local characteristics of upward gas-liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 1981, vol. 7, no. 1, pp. 63–81.
14. Borisov A.A., Borisov A.A., Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. Rarefaction shock wave near the critical liquid-vapor point. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, vol. 126, pp. 59–73.
15. Dontsov V.E., Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E. Udarnyye volny umerennoy intensivnosti v dvukhfaznoy srede [Shock waves of moderate amplitude in two-phase medium]. *Akustichesky zhurnal*, 1985, no. 2, pp. 193–196.
16. Mukhin V.A., Nakoryakov V.E., Petrik P.T., Serdakov G.S. Kondensatsiya para na naklonnoy plastine, pomeshchennoy v poristuyu sredyu [Steam condensation on the inclined plate placed in a porous medium]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 5, pp. 85–90.
17. Zhak V.D., Mukhin V.A., Nakoryakov V.E., Safonov S.A. Rasprostranenie zatoplennoy strui v uzkoj shcheli [Distribution of submerged jet in a narrow gap]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 3, pp. 69–77.
18. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Kozmenko B.K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 1986, vol. 12, no. 3, pp. 337–355.
19. Dontsov V.E., Kuznetsov V.E., Markov P.G., Nakoryakov V.E. Evolyutsiya voln davleniya umerennoy intensivnosti v zhidkosti s puzyrkami gaza [The evolution of the pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles]. *Akustichesky zhurnal*, 1987, vol. 33, no. 6, pp. 1041–1044.
20. Gorelik R.S., Kashinsky O.N., Nakoryakov V.E. Issledovanie opusknogo puzyrkovogo techeniya v vertikalnoy trube [Research of bubbly downflow in a vertical pipe]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1987, vol. 28, no. 1, pp. 69–73.
21. Dontsov V.E., Kuznetsov V.V., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie voln davleniya v poristoy srede, насыщенной жидкостью [Pressure waves in saturated porous media]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1988, no. 1, pp. 120–130.
22. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R., Pribaturin N.A. The wave dynamics of a vapour-liquid medium. *International Journal of Multiphase Flow*, 1988, vol. 14, no. 6, pp. 655–677.
23. Gorelik R.S., Kashinsky O.N., Nakoryakov V.E. Teploobmen ot stenki k voskhodyashchemu puzyrkovomu techeniyu pri malykh skorostyakh zhidkoy fazy [Heat transfer from a wall to the ascending bubbly flow with low liquid-phase velocities]. *High Temperature*, 1989, vol. 27, no. 2, pp. 300–305.
24. Dontsov V.E., Kuznetsov V.E., Markov P.G., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie voln davleniya v zhidkosti s puzyrkami gaza raznykh razmerov [Propagation of pressure waves in liquid with gas bubbles of different sizes]. *Akustichesky zhurnal*, 1989, vol. 35, no. 1, pp. 157–159.
25. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Petukhov A.V., Gorelik R.S. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow. *Experiments in Fluids*, 1989, vol. 7, no. 8, pp. 560–566.
26. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E. Pressure waves in saturated porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, vol. 15, no. 6, pp. 857–875.
27. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E., Markov P.G. Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, vol. 16, no. 5, pp. 741–749.
28. Vorontsov S.S., Gorin A.V., Nakoryakov V.E., Khoruzhenko A.G., Chupin V.M. Natural convection in a hele-shaw cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, no. 3, pp. 703–709.
29. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V. Experimental investigation of upward gas-liquid flow in a vertical narrow annulus. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, vol. 18, no. 3, pp. 313–326.
30. Nakoryakov V.E., Yaichnikova N.N. Laminarnaya struya v «uzkoj» shcheli pri bolshikh chislakh Reynoldsa [Laminar jet in a «narrow» gap at high Reynolds numbers]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1985, no. 5, pp. 30–35.
31. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Wave formation on vertical falling liquid films. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, vol. 11, no. 5, pp. 607–627.
32. Nakoryakov V.E., Vasserman E.S., Pokusaev B.G., Pribaturin N.A. Usilenie amplitudy voln davleniya v parozhidkostnoy srede puzyrkovoy struktury [Increased amplitude of pressure waves in liquid-vapor medium with bubble structure]. *High Temperature*, 1994, vol. 32, no. 3, pp. 411–417.
33. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in liquid suspension with solid particles and gas bubbles. *Multiphase flow 1995: Proc. of the 2<sup>nd</sup> International conference on Multiphase Flow*. Kyoto, Japan, April 3–7, 1995. Vol. 1, pp. 11–17.
34. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Volny davleniya v suspenzii zhidkosti s tverdyimi chastitsami i gazovymi puzyrkami [Pressure waves in liquid slurry with solid particles and gas bubbles]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1995, no. 1, pp. 32–40.
35. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, vol. 38, no. 11, pp. 2127–2134.
36. Nakoryakov V.E., Dontsov V.E., Pokusaev B.G. Pressure waves in a liquid suspension with solid particles and gas bubbles. *Inter-*



- national Journal of Multiphase Flow*, 1996, vol. 22, no. 3, pp. 417–429.
37. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, vol. 22, no. S1, pp. 116–120.
  38. Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V. Kapilyarnye yavleniya, teplo-massoobmen i volnovye protsessy pri dvukhfaznom techenii v poristykh sistemakh i zasypkakh [Capillary phenomena, heat-and-mass exchange, and wave processes in two-phase flow in porous systems and packings]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 4, pp. 155–166.
  39. Nakoryakov V.E., Leontiev A.I., Mostinsky I.L., Hartnett J.P. In memoriam – Professor Michael Adol'fovich Styrikovich (1902–1995). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40, no. 3, pp. 503–504.
  40. Nakoryakov V.E., Alekseenko S.V., Medvetskaya N.V., Mostinski I.L., Osipov M.L., Volchkov E.P., Zeigavnik Ju.A., Hartnett J.P. Alexander I. Leontiev on his 70<sup>th</sup> birthday. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, vol. 41, no. 1, pp. 1–2.
  41. Gorin A.V., Egorov A.Yu., Nakoryakov V.E., Chupin V.M. Estestvennaya konvektsiya ot tsilindra v uzkoj shcheli i poristoy srede [Natural convection from cylinder in a narrow slit and a porous medium]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 1, pp. 140–150.
  42. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Rasprostranenie udarnykh voln v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkostyu s puzyrkami rastvorimogo gaza [Propagation of shock waves in porous medium saturated with liquid with bubbles soluble gas]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 5 (243), pp. 91–102.
  43. Grigorieva N.I., Nakoryakov V.E. Modelirovanie teplo- i massopere-nosa pri absorbtzii v binarnykh dvukhfaznykh sistemakh, ispolzuemykh v teplovykh nasosakh [Simulation of heat and mass transfer in binary biphasic absorption systems used in heat pumps]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 1 (245), pp. 115–123.
  44. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, vol. 27, no. 12, pp. 2023–2041.
  45. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Pressure-wave damping in a liquid with bubbles produced by two kinds of gases. *Doklady Physics*, 2002, vol. 47, no. 2, pp. 153–155.
  46. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Evolyutsiya voln davleniya v zhidkosti s puzyrkami dvukh raznykh gazov [Evolution of pressure waves in liquid with bubbles of two different gases]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2002, vol. 43, no. 2 (252), pp. 110–115.
  47. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E. Volny davleniya v gazozhidkostonoy srede s rassloennoy strukturoy zhidkost – puzyrkovaya smes [Pressure waves in a gas-liquid medium with a stratified structure of liquid – bubble mixture]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2003, vol. 44, no. 4 (260), pp. 102–108.
  48. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A. Teplomassopere-nos pri absorbtzii para nepodvizhnym sloem rastvora [Heat and mass transfer in vapor absorption with solution fixed bed]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2003, vol. 44, no. 2 (258), pp. 101–108.
  49. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya malyykh dobovok pav na neizotermicheskuyu absorbttsiyu [Experimental study of surfactants small additions effect on non-isothermal absorption]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, vol. 45, no. 2 (264), pp. 156–161.
  50. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A., Marchuk I.V. Vapor absorption by immobile solution layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 6–7, pp. 1525–1533.
  51. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Grigoryeva N.I., Dekhtyar R.A. The effect of surfactants on absorption under conditions of heat pumps and refrigerators. *International Journal of Low Carbon Technologies*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 273–284.
  52. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Chernov A.A. Udar nye volny v vode s puzyrkami freona-12 s obrazovaniem gidrata gaza [Shock waves in water with bubbles of Freon-12 with gas hydrate formation]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 3 (283), pp. 58–75.
  53. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at steam absorption by surfactant additives. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 21–22, pp. 5175–5181.
  54. Nakoryakov V.E., Gasenko V.G. Matematicheskaya model katodnogo uzla toplivnogo elementa s tverдыm ehlektrolitom [Mathematical model of a fuel cell cathode assembly with a solid electrolyte]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 5 (273), pp. 27–37.
  55. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Dontsov E.V. Protsessy gidratobrazovaniya i rastvoreniya za udarnoy volnoy v zhidkosti s puzyrkami gaza (smes azota i uglekislogo gaza) [Hydrating and dissolving behind a shock wave in liquid with gas bubbles (mixture of nitrogen and carbon dioxide)]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, vol. 50, no. 2 (294), pp. 178–187.
  56. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bartashevich M.V. Heat and mass transfer in the entrance region of the falling film: absorption, desorption, condensation and evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 54, no. 21–22, pp. 4485–4490.
  57. Nakoryakov V.E., Misyura S.Ya., Elistratov S.L. The behavior of water droplets on the heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 23–24, pp. 6609–6617.
  58. Nakoryakov V.E., Bartashevich M.V., Ostapenko V.V. Heat and mass transfer in the liquid film on a vertical wall in roll-wave regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 23–24, pp. 6514–6518.
  59. Lezhnin S.I., Nakoryakov V.E. Growth of vapor bubbles from the solution with one volatile component at surface desorption. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 5–6, pp. 1433–1440.
  60. Nakoryakov V.E., Tsoy A.N., Mezentsev I.V., Meleshkin A.V. Eksperimentalnye issledovaniya protsesssa inzhektzii zhidkogo azota v vodu [Experimental studies of liquid nitrogen injection into water]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 293–298.

Received: 24 June 2015.

**Редактирование** *А.С. Глазырин*  
**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Перевод на англ. язык и корректура** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*


Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Подписано к печати *xx.xx.2015*. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,05. Уч.-изд. л. 14,51.  
Заказ *xxx-15*. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822) 563-291, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru), [izv@tpu.ru](mailto:izv@tpu.ru)