

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



ISSN 2413-1830

# ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

**Инжиниринг георесурсов**

Том 326, № 11, 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 2413-1830

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 геоактивов.

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

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов
- 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 2413-1830

# BULLETIN

## OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

**Geo Assets Engineering**

Volume 326, № 11, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

**Editorial Board**

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
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 2413-1830) 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

- Результаты исследований природных условий и инженерно-геологического строения долины реки Большая Александровка (О. Сахалин)**  
Мелкий В.А., Ильин В.В., Пищальник В.М., Сахаров В.А., Семенов Н.С., Первухин С.М., Верхотуров А.А., Белянина Я.П., Еременко И.В., Зарипов О.М., Гальцев А.А.
- Геологическое строение, стратиграфия и перспективы нефтегазоносности нижнесреднеюрских отложений Томской области**  
Мельник И.А., Смирнова К.Ю., Зимина С.В., Жданова А.В., Елисеева О.Д., Шеламова Е.В.
- Линейное отображение географических координат подвижного объекта на линейную часть магистрального нефтепровода**  
Кукало И.А., Гривцов С.Н.
- Применение планетаной шаровой мельницы для получения экранирующих композиционных покрытий на основе полиэфирных порошковых красок для защиты магниевых сплавов**  
Панин С.В., Языков С.Ю., Даммер В.Х., Овечкин Б.Б., Суслев В.И., Дорожкин К.В.
- Метод определения сходства структур графов на основе выделения частичного изоморфизма в задачах геоинформатики**  
Погребной А.В.
- Методика расчета щелевого фильтра**  
Виноградов В.В., Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М.
- Энергосбережение в системах теплоснабжения крупных муниципальных объединений, запитанных от нескольких источников тепла**  
Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В.
- Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием**  
Дудкин А.Н., Леонов А.П., Супуева А.С.
- Экспериментальное обоснование параметров подземного выщелачивания металлов**  
Голик В.И., Лукьянов В.Г., Страданченко С.Г., Масленников С.А.
- Экологизация кадастровой оценки земель для устойчивого развития урбанизированных территорий**  
Попов В.К., Козина М.В.
- Магнитодиэлектрический композиционный состав и его применение для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических изделий**  
Смирнов Г.В., Хасанов О.Л., Смирнов Д.Г., Полисадова В.В., Петюкевич М.С.
- О влиянии термодиффузии на перераспределение примеси при остывании столба бинарной жидкости**  
Глухов А.Ф., Демин В.А., Третьяков А.В.
- Вариабельность отношения стабильных изотопов углерода в пыльце лиственных пород древесных видов в зависимости от погодных условий сезона вегетации**  
Бляхарчук Т.А., Симонова Г.В., Ветрова О.В.
- Угольный слой при микроволновом нагреве: аналитическое исследование при смешанных граничных условиях I и II рода**  
Саломатов В.В., Карелин В.А., Заворин А.С., Саломатов Вас.В., Пашченко С.Э.
- Экологические аспекты в электросберегающей политике на этапе создания в России интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью**  
Балабанов М.С., Бабошкина С.В., Хамитов Р.Н.

## CONTENTS

- 6 Results of studies of natural conditions and engineering-geological structure of the valley of the river Bolshaya Aleksandrovka (Sakhalin island)**  
Melkiy V.A., Ilin V.V., Pishchalnik V.M., Sakharov V.A., Semenov N.S., Pervukhin S.M., Verkhoturov A.A., Belyanina Y.P., Eremenko I.V., Zaripov O.M., Galtsev A.A.
- 20 Geological structure, stratigraphy and perspectives of oil and gas potential in the low-middle Jurassic deposits in Tomsk region**  
Melnik Ig.A., Smirnova K.Yu., Zimina S.V., Zhdanova A.V., Eliseeva O.D., Shelamova E.V.
- 31 Linear referencing of moving object geo-coordinates to the linear part of the main oil pipelines**  
Kukalo I.A., Gritsov S.N.
- 44 Application of planetary ball mill for manufacturing shielding composite coatings based on polyester powder paints to protect magnesium alloys**  
Panin S.V., Yazykov S.Yu., Dammer V.Kh., Ovechkin B.B., Suslyayev V.I., Dorozhkin K.V.
- 65 Method of graph vertices differentiation and solution of the isomorphism problem in geoinformatics**  
Pogrebnoy A.V.
- 67 Calculation of a slotted filter**  
Vinogradov V.V., Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M.
- 75 Energy saving in systems of heat supply of the large municipal associations powered from several sources of heat**  
Zvonareva Yu.N., Vankov Yu.V.
- 83 The influence of defects on the winding insulation resistance to operational loads inherent for variable frequency drive**  
Dudkin A.N., Leonov A.P., Supueva A.S.
- 90 Experimental substantiation of the parameters of metal underground leaching**  
Golik V.I., Lukyanov V.G., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A.
- 98 Ecologization of cadastral valuation of lands for sustainable development of urbanized lands**  
Popov V.K., Kozina M.V.
- 106 The application of magneto-dielectric composite mixture for alternative technology of winding impregnation in electrical and radio engineering products**  
Smirnov G.V., Khasanov O.L., Smirnov D.G., Polisadova V.V., Petyukevich M.S.
- 118 On thermodiffusion influence on the dopant distribution during the freezing of binary liquid column**  
Glukhov A.F., Demin V.A., Tretyakov A.V.
- 128 Variability of content of stable isotopes of carbon in pollen of deciduous tree species depending on weather conditions of vegetative season**  
Blyakharchuk T.A., Simonova G.V., Vetrova O.V.
- 135 Coal layer under microwave heating: analytical study under mixed boundary conditions I and II of the genus**  
Salomatov V.V., Karelin V.A., Zavorin A.S., Salomatov V.V., Pashchenko S.E.
- 141 Electric saving and environmental aspects in policy at the stage of creation in Russia smart grid**  
Balabanov, Baboshkina S.V., Khamitov R.N.

УДК 551.4.02:551.3.051

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДОЛИНЫ РЕКИ БОЛЬШАЯ АЛЕКСАНДРОВКА (О. САХАЛИН)**

**Мелкий Вячеслав Анатольевич,**

д-р техн. наук, зав. каф. геологии и природопользования,  
директор Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: vamelkiy@mail.ru

**Ильин Владимир Вениаминович,**

ст. преподаватель каф. геологии и природопользования Технического нефтегазового института,  
помощник ректора Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: vladimirilyin7@gmail.com

**Пищальник Владимир Михайлович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: vpishchalnik@rambler.ru

**Сахаров Валерий Александрович,**

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и природопользования, зав. лаб. физико-химических исследований Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: sakhsakh@yandex.ru

**Семенов Николай Сергеевич,**

канд. пед. наук, зав. каф. эксплуатации транспорта  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: Proverka05@mail.ru

**Первухин Сергей Михайлович,**

канд. геогр. наук, доцент каф. геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: pervuhin.sergey1961@yandex.ru

**Верхотуров Алексей Александрович,**

ст. преподаватель каф. геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: ussr-91@mail.ru

**Белянина Яна Павловна,**

ст. преподаватель каф. геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: yana-b@inbox.ru

**Еременко Ирина Владимировна,**

ст. преподаватель каф. геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: IrinkaEremenko@yandex.ru

**Зарипов Олег Мансурович,**

ст. преподаватель каф. строительства Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета, Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: ole-zaripov@mail.ru

**Гальцев Алексей Андреевич,**

ст. преподаватель каф. геологии и природопользования  
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,  
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: galts.alexey@gmail.com

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью точного представления о строении верхней части геологического разреза, основанного на понимании генезиса отложений для использования в качестве инженерно-геологического обеспечения строительства на исследуемой территории.

**Цель работы:** выявление инженерно-геологических условий в долине р. Бол. Александровка по результатам инженерных изысканий и космического мониторинга природных процессов, а также определение особенностей формирования неоген-четвертичных отложений территории.

**Методы исследования:** методы инженерно-геологических исследований – наземные наблюдения, буровые работы; комплекс лабораторных методов определения физико-механических свойств пород: определение гранулометрического состава связных и несвязных осадочных пород, плотности и объемной массы, расчет пористости, влажности и максимальной молекулярной влагоемкости, пластичности, липкости, набухания, других; методы определения петрофизических свойств магматических пород: определение плотности, объемной массы, водонасыщенности, водопоглощения, влажности, капиллярного поднятия, пористости, прочностных и упругих свойств; геофизические методы: вертикальное электрическое зондирование и сейсморазведка по методу преломленных волн; прямые методы корреляции грунтовых разрезов, основанные на изучении кернов и сопоставлении колонок в разных скважинах; стратиграфический метод; космический мониторинг природных процессов.

**Результаты.** В результате инженерно-геологических изысканий был составлен геологический разрез протяженностью семь километров для нижней части долины реки Большая Александровка, расположенной в центральной части о. Сахалин. Выявлены условия формирования верхней части разреза, выделены инженерно-геологические элементы и выявлено их пространственное положение. Выполнено районирование территории долины по совокупности характеристик отложений и изменчивости отдельных параметров в различных частях разреза. Определено, что начиная с верхнеплиоценового времени днище долины реки Бол. Александровка было подвержено процессу устойчивого поднятия. Выявлен перерыв в аллювиальных отложениях между пикетами 31–47, который обусловлен промыванием рекой нового спрямленного русла при стоке с более высокой террасы, с уровнем бровки на высоте 12 м, на более низкую, с уровнем поверхности 4–6 м над уровнем моря. Образование низкой морской террасы абразионно-аккумулятивного генезиса связано с последнедевической трансгрессией, произошедшей около 7–9 тыс. л. н., когда море уходило вглубь долины р. Бол. Александровка на 5–7 км. Формирование террасы с уровнем поверхности 12–15 м можно объяснить поднятием уровня океана при значительной гляциоэвстатической трансгрессии позднелайстоценового возраста.

**Ключевые слова:**

Инженерно-геологические изыскания, космический мониторинг, эндогенные и экзогенные факторы, эрозия, аккумуляция, перенос твердого стока.

**Введение**

Изучены природные условия и инженерно-геологическое строение долины реки Большая Александровка на участке от поселка Михайловка до г. Александровск-Сахалинский. Инженерно-геологические изыскания выполнялись для изучения условий по трассе прокладки водопровода от водозабора до города. Глубина исследований по трассе составляет 5–6 м. Расстояния между скважинами – до 300 м. Всего пробурено 38 скважин. Выход керна не менее 90 %. Лабораторные испытания грунтов выполнены в Тихоокеанской инженеринговой компании. Кроме того, для общей характеристики района использованы данные, полученные при бурении скважин глубиной до 15 м на площадках проектируемых сооружений, и материалы геофизических исследований.

**Физико-географическая характеристика исследуемой территории**

Географическое положение

Исследуемая территория расположена в центральной части о. Сахалин, в окрестностях г. Александровска-Сахалинского, который является административным центром муниципального образования – городской округ «Александровск – Сахалинский район». Территория находится к западу от осевой линии Западно-Сахалинских гор и занимает нижнюю северную часть долины р. Большой Александровки, впадающей в Татарский пролив (рис. 1). В меридиональном направлении объект исследования раскинулся между 50°50' и 50°55' с. ш. От широты местности зависит продолжительность дня

(табл. 1). Продолжительность светового дня сказывается на количестве солнечной энергии, получаемой земной поверхностью и, соответственно, определяет климатические условия территории.

**Таблица 1.** Продолжительность дня во время зимнего и летнего солнцестояния на севере и юге территории [1]

**Table 1.** Day length in winter and summer solstice in the north and in the south of the territory [1]

Местность Region	Дата/Date		Продолжительность дня Day length	
			22 июня (June)	22 декабря (December)
50°50' с. ш.			16 ч 31 мин	07 ч 57 мин
50°55' с. ш.			16 ч 32 мин	07 ч 56 мин

Восточные границы исследуемого района проходят по водоразделу Камышового хребта с абсолютными высотами до 918,3 м (г. Бородаковская), западные – по водоразделу Крутого хребта с абсолютными высотами в южной части до 787,6 м (г. Лахина). Горные сооружения и долина ориентированы в субмеридиональном направлении. Долина реки Бол. Александровка, как практически все реки этой части побережья, в нижней части меняет свое направление с северного на северо-западное и выходит к Александровскому заливу Татарского пролива.

Рельеф

Хребты, окружающие долину, характеризуются низкогорным и холмисто-увалистым рельефом с высотами до 1000 м. Склоны, как с восточной, так

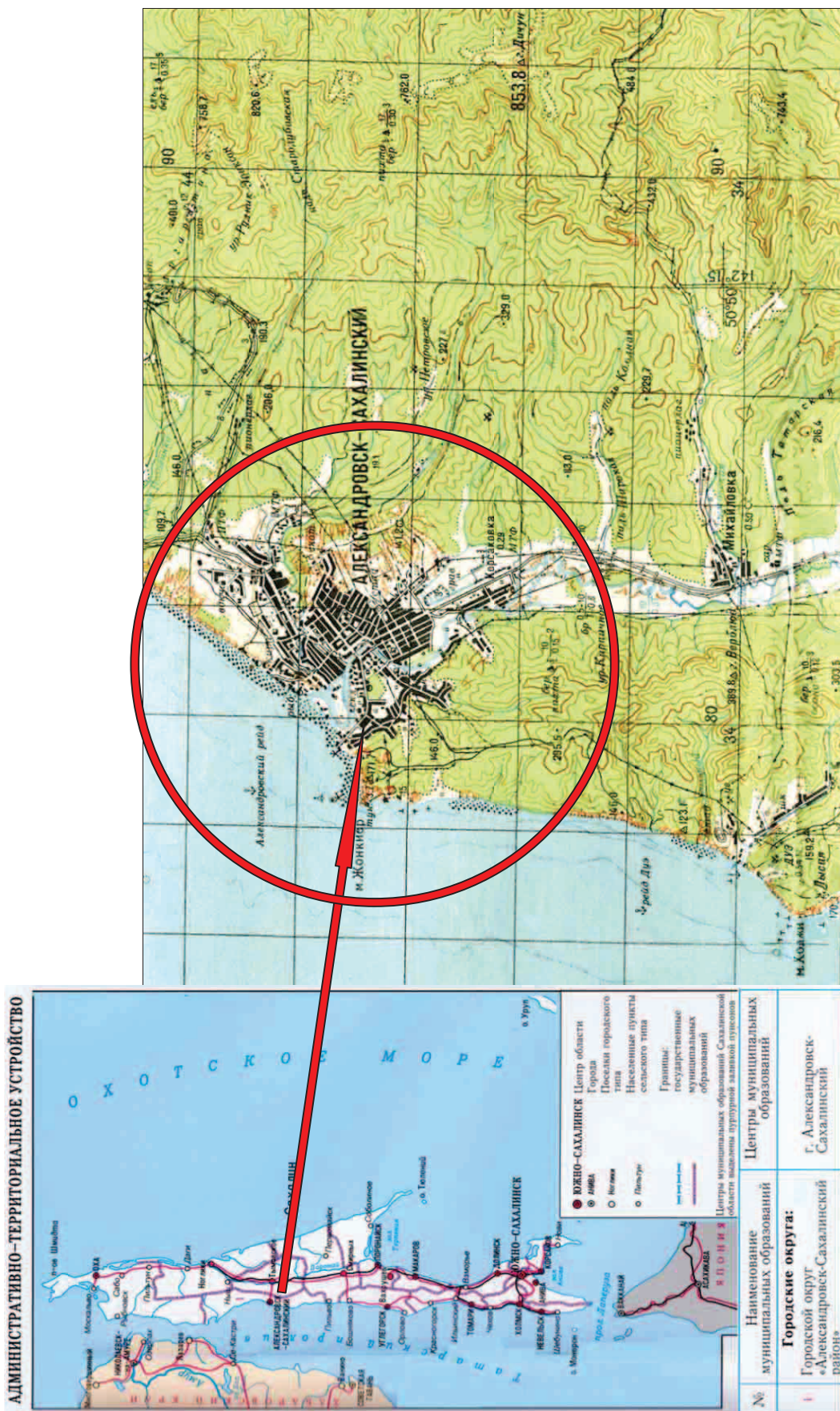


Рис. 1. Схема местонахождения района работ

Fig. 1. Location of works region



и с западной стороны долины Бол. Александровки, достаточно густо расчленены эрозионными врезами, долинами ручьев, мелких рек, имеющими, как правило, V-образное поперечное сечение в средних и верхних частях и корытообразное – в устьевых. Территорию района пересекают западные отроги Камышового хребта. Прибрежная часть Западно-Сахалинских гор в районе представлена хребтом Крутым Северо-Прибрежной цепи, отличающимся резкими формами рельефа с крутыми склонами и остроконечными вершинами.

Горы состоят из ряда коротких параллельных горных гряд с господствующим северо-северо-западным и северо-западным направлением гребней, согласующимся с простираемостью пластов горных пород и кулисообразным примыканием друг к другу.

Особенно крутые склоны горных гряд имеют уклоны  $30-60^\circ$  и приурочены к разрывным нарушениям.

Проведенные морфометрические исследования рельефа Крутого хребта по величине глубины расчленения показывают, что подавляющая часть форм рельефа на данной территории имеет превышения более 200 м, что свойственно горным странам. В районе Александровско-Агневской депрессии высоты не превышают уровня 700–900 м. Однако интенсивность расчленения не только остается значительной, а даже наоборот, несмотря на небольшие абсолютные отметки, приобретает черты рельефа, свойственные высокогорному.

В Александровско-Агневской депрессии р. Бол. Александровка течет спокойно, долина ее широкая с аллювиально-эрозионными террасами, достигающими высоты 50 м. Днище долины Бол. Александровки имеет ширину от 0,8 до 1,5 км и расширяется с юга на север. Оно слабо расчленено врезами притоков, достаточно плоское с уклоном к руслу реки  $\sim 0,0015-0,0018$ .

Берега реки обрывистые, высотой 1–4 м, ширина русла от 20 до 40, в устье до 60 м, живое сечение потока 7–50 м<sup>2</sup>. Русло сильно меандрирует, что вызвано блочно-тектоническим строением коренных пород. Глубина реки по фарватеру в летнюю межень (примерно середина июля) изменяется от 0,2 м на перекатах до 0,5 м на плесах, в русловых ямах достигает 2 м. В нижнем течении (до с. Корсаковка) дно русла илистое, скорость течения 0,2–0,6 м/с, выше дно русла гравийно-песчаное, переходящее в гравийно-галечное, а от северной окраины п. Михайловка – с включением валунов (до 10–20 %) и в 2,5 км выше в береговом обрыве обнажаются коренные породы. Долина реки в нижнем течении выработана настолько, что приливная волна в Александровском заливе создает подпор стоку даже в 4 км от устья (до с. Корсаковка) высотой до 0,8 м, а в 1,5 км от устья – примерно до 1,8 м.

Геологическое строение района изысканий

Стратиграфический разрез района изысканий представлен породами меловой, неогеновой и четвертичной систем.

Довольно широкое распространение в районе изысканий имеют верхнемеловые отложения, отнесенные в 1938 г. А.А. Капицей, Л.М. Саяпиной и Б.М. Штемпелем к тымовской свите [2]. Свита характеризуется глинистым составом отложений, которые представлены чередующимися пачками темно-серых алевролитов и аргиллитов с линзами мелкозернистых песчаников. Мощность свиты 600–1000 м.

Материнскими породами четвертичных отложений в основном являются породы неогеновой системы – верхнедуйской, сертунайской, александровской и маруямской свит [3], суммарная мощность которых составляет более 2000 м, отложения представлены песчаниками, алевролитами, гравелитами, конгломератами, аргиллитами с прослоями глин и песков. Для изученной территории свойственно широкое развитие в составе неогеновых отложений вулканогенных и нормально-осадочных терригенных образований.

Во всех комплексах неогена отмечено присутствие диатомовых отложений. Комплексы фораминифер по экологическому облику очень разнообразны [4], что свидетельствует о большом разнообразии обстановок осадконакопления – от заболоченных, периодически затапливаемых приморских равнин до батинальных условий верхней части материкового склона. Фораминиферы представлены практически исключительно бентосом.

Геоморфология

В бассейне реки Бол. Александровка весьма интенсивно протекают рельефообразующие процессы: эрозия, денудация, заболачивание. Также наблюдаются сход снежных и каменных лавин, оползни, перемещение морских песков на побережье и другие экзогенные процессы. Распределение форм рельефа и элементов орографии зависит также от тектонической структуры территории, неотектонических движений, некоторое значение при формировании рельефа имеют сейсмические подвижки.

Структурная позиция долины реки Бол. Александровка определяется тектоническими разрывами, ограничивающими складчатые структуры Камышового и Крутого хребтов, расположенных в ее обрамлении. Можно уверенно говорить о приуроченности продольных долин к крупным тектоническим структурам о. Сахалин. Заложение синклинальной зоны, по которой течет р. Бол. Александровка, произошло, по мнению С.М. Александрова, в раннеплиоценовое время [5–7]. Большое значение рельефообразующей роли сбросовых дислокаций конца плиоценовой эпохи при формировании крупных элементов орографии на Сахалине отмечали Н.Н. Тихонович и П.И. Полевой [8]. В это время произошло заметное изменение рельефа на всей территории Хоккайдо-Сахалинского складчатого сооружения.

Долина реки в современном плане представляет собой хорошо выраженный грабен, заполнен-

ный толщами плиоценовых осадков, имеющих тектонические контакты с породами верхнего мела – неогена. В рельефе грабен выражается в виде узкой внутригорной холмисто-увалистой депрессии, восточный борт депрессии растянут и полог, западный имеет форму крутого тектонического уступа.

Устьевая часть депрессии характеризуется общим погужением толщ и увеличением мощности плейстоценовых отложений, в то время как в верховьях долины р. Бол. Александровка выходят на поверхность не только дочетвертичные, но и донегеновые отложения.

#### Климат

Муссонный подтип умеренного климата, господствующий на востоке Евразии и в том числе на Сахалине, характеризуется сменой устойчивых ветров (муссонов) по сезонам, что оказывает влияние на количество и режим осадков. Зимой здесь дует холодный ветер с континента, поэтому зима ясная и холодная (–20...–27 °С). Летом ветра с Тихого океана приносят чаще теплую дождливую погоду.

Информация о климате в городском округе «Александровск – Сахалинский район» собирается на местной метеостанции. Местоположение метеостанции Александровск-Сахалинский (Сахалинская область, Россия): широта 50,90°, долгота 142,16°, высота над уровнем моря 29,5 м. Данные метеостанции характеризуют климатические условия центральных районов западного побережья острова, а также гидрологический режим прибрежной зоны Татарского пролива в районе. Сведения об основных климатообразующих факторах и атмосферных процессах представлены в табл. 2–4, а также на графиках и диаграммах.

Следует отметить, что в исследуемом районе климат отличается от соседних территорий Сахалина большим количеством солнечных дней, умеренно теплым летом и относительно холодной зимой (в Тымовской долине еще холоднее). Влияние муссона в районе ослаблено: сказывается защищенность горами с востока.

#### Гидрография

Река Бол. Александровка относится к бассейну Татарского пролива. Длина реки – 38 км, площадь бассейна – 236 км<sup>2</sup>. Берет начало в северной части хребта Крутой. Течет по узкой долине между хребтами Крутой и Камышовый Западно-Сахалинских гор, в меридиональном направлении, с юга на север. Впадает в Александровский залив.

Вследствие выпадения на территории большого количества осадков в условиях малой испаряемости и преобладания горного рельефа речная сеть в районе развита очень хорошо. Густота речной сети в бассейне р. Бол. Александровка колеблется от 1,0 до 1,5 км/км<sup>2</sup>.

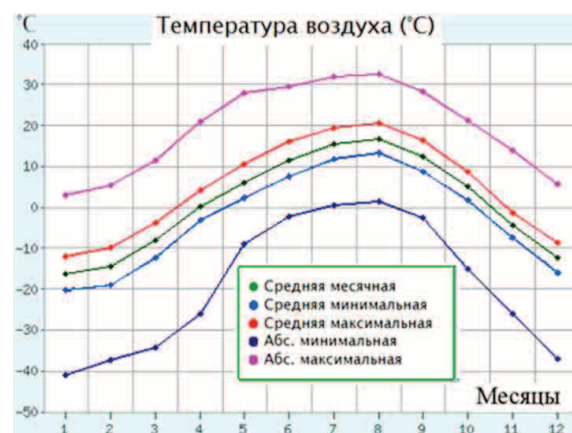
Питание реки смешанное с преобладанием снегового. Высокий уровень воды наблюдается в третьей декаде апреля, низкий – в первой декаде

августа. Ледостав начинается во второй декаде ноября, весенний ледоход – в третьей декаде апреля. Крупные притоки: правые – Тымовская (12 км), Малая Александровка (14 км). В устье находится г. Александровск-Сахалинский.

**Таблица 2.** Температура воздуха в г. Александровске-Сахалинском [9]

**Table 2.** Air temperature in Aleksandrovsk-Sakhalinsky [9]

Месяц Month	Абсолют. минимум Absolute minimum	Средний минимум Mean minimum	Средняя Average	Средний максимум Mean maximum	Абсолют. максимум Absolute maximum
Январь January	–41,0 (1904)	–20,3	–16,3	–12,0	3,0 (2010)
Февраль February	–37,3 (1892)	–19,0	–14,6	–10,0	5,4 (1960)
Март March	–34,2 (1888)	–12,4	–8,0	–3,7	11,4 (1990)
Апрель April	–25,9 (1883)	–3,3	0,2	4,2	20,9 (2008)
Май May	–8,9 (1889)	2,2	5,9	10,7	28,1 (1896)
Июнь June	–2,4 (1886)	7,5	11,4	16,1	29,4 (1898)
Июль July	0,5 (1887)	11,8	15,4	19,4	32,0 (1901)
Август August	1,5 (1889)	13,2	16,6	20,5	32,6 (1897)
Сентябрь September	–2,5 (1885)	8,6	12,3	16,4	28,3 (1899)
Октябрь October	–15,0 (1972)	1,8	5,1	8,7	21,2 (1948)
Ноябрь November	–26,0 (1882)	–7,5	–4,5	–1,3	13,8 (1939)
Декабрь December	–36,9 (1888)	–15,9	–12,3	–8,8	5,7 (1968)
Год Year	–41,0 (1904)	–2,8	0,9	5,0	32,6 (1897)



**Рис. 2.** Графики изменений температур воздуха в г. Александровске-Сахалинском [9]

**Fig. 2.** Graphs of air temperature changes in Aleksandrovsk-Sakhalinsky [9]

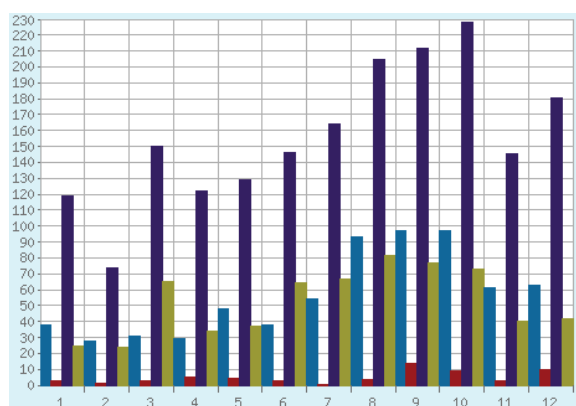
Почвы

Почвенный покров района изучен на примере агроландшафтов (сельскохозяйственных угодий бывшего совхоза «Александровский») представлен следующими типами почв [11]: лугово-дерновые и пойменно-дерновые – 1161 га (68,3 %); бурые лесные – 514,2 га (30,3 %); болотные (торфяники) – 24,8 га (1,4 %) [10].

**Таблица 3.** Характеристики процессов выпадения осадков в г. Александровске-Сахалинском [9]

**Table 3.** Characteristics of precipitation in Aleksandrovsk-Sakhalinsky [9]

Месяц Month	Норма, мм Norm, mm	Месячный минимум Monthly minimum	Месячный максимум Monthly maximum	Суточный максимум Daily maximum
Январь January	38	3 (1882)	119 (1919)	25 (1901)
Февраль February	28	1 (1902)	74 (1994)	24 (2014)
Март March	31	3 (1996)	150 (1904)	65 (1904)
Апрель April	29	5 (1982)	122 (1888)	34 (1962)
Май May	48	4 (1955)	129 (1919)	37 (1995)
Июнь June	38	3 (1989)	147 (2004)	64 (1936)
Июль July	54	0,2 (1954)	164 (1959)	67 (1938)
Август August	93	4 (1998)	205 (1988)	82 (1993)
Сентябрь September	97	14 (1998)	212 (1949)	77 (1935)
Октябрь October	97	9 (1925)	228 (1997)	73 (1944)
Ноябрь November	61	3 (1925)	146 (2006)	40 (2006)
Декабрь December	63	10 (1881)	181 (1916)	42 (1901)
Год Year	677	357 (1884)	880 (1889)	82 (1993)



**Рис. 3.** Диаграмма характеристик процессов выпадения осадков в г. Александровске-Сахалинском [9]

**Fig. 3.** Diagram of precipitation characteristics Aleksandrovsk-Sakhalinsky [9]

**Таблица 4.** Число дней с твердыми, жидкими и смешанными осадками в различные месяцы и в году [9]

**Table 4.** Number of days with solid, liquid and mixed precipitations in different months and in the year [9]

Вид осадков Precipitation	Месяцы/Months												Год/Year
	Январь/January	Февраль/February	Март/March	Апрель/April	Май/May	Июнь/June	Июль/July	Август/August	Сентябрь/September	Октябрь/October	Ноябрь/November	Декабрь/December	
Твердые Solid	26	22	20	11	2	0	0	0	0	3	21	28	133
Смешанные Mixed	0,2	0	0,3	5	4	0	0	0	0,2	6	4	1	21
Жидкие Liquid	0	0	0	3	13	15	16	20	20	14	1	0	102

Лугово-дерновые почвы имеют матрикс, представленный тяжелым суглинком и глинами. Они являются наиболее плодородными почвами в Сахалинской области. Эти почвы кислые, редко слабокислые. Обменная кислотность в них обусловлена обменным алюминием. Они увлажняются как почвенно-грунтовыми водами, так и атмосферными осадками.

В условиях Сахалина непринятие мер по снижению переувлажнения почв ведет к интенсивному развитию процессов оглеения, в результате чего наиболее плодородные лугово-дерновые почвы переходят в категорию худших.

Пойменно-дерновые почвы имеют изменения по потенциальному плодородию от прирусловой части поймы к центральной и притеррасной; в этом направлении в почвах увеличивается общий запас органического вещества и содержания общего азота, а также возрастает сумма обменных оснований. Лучшими являются незаболоченные незасоленные почвы зернистой поймы. Такие почвы имеют большой гумусовый горизонт, значительный общий запас органического вещества (до 350–550 т на 1 га).

Бурые лесные почвы в естественном состоянии формируются под елово-пихтовыми лесами, в нижней трети склонов гор, а также на пологих увалах и на низких водоразделах. Непременным условием для формирования бурых лесных почв является хороший внутрипочвенный дренаж, когда избыток влаги быстро удаляется из почвы. Бурые лесные почвы имеют небольшой по мощности профиль (60–80 см) со слабо выраженными морфологическими генетическими горизонтами. Сложены они обычно суглинистыми, иногда тяжелосуглинистыми, реже глинистым материалом, встречается также щебень, различный по форме и размерам.

Болотные почвы формируются в депрессиях рельефа, там, где обеспечен приток грунтовых вод, богатых минеральными веществами. Близость их залегания приводит к формированию минерализованного торфа [10].

В отобранных на объекте пробах (13 проб) производилось определение качественных показате-

**Таблица 5.** Фоновые значения концентраций химических компонентов для почв и грунтов [10]**Table 5.** Backgrounds of chemical component concentrations for soils and grounds [10]

Химический компонент Chemical component	Содержание/Content		
	Фоновый показатель совхоз «Александровский»*** Background, sovkhos «Aleksandrovsky»***	Фоновый показатель для Сахалинской области**** Background for Sakhalin region****	ПДК MPC
Нитраты (NO <sub>3</sub> )/Nitrate	6,0–8,5	6,0–8,5	130
Нефтеуглеводороды Oil hydrocarbons	10,0	***	1000
Бензапирен/Benzapyrene	<0,005	<0,005	0,02*
Фенолы/Phenols	4,0	–	**
Сера (S)	9,0	3,0–12,0	160
Цинк (Zn)	33,98	49,91	100
Медь (Cu)	10,53	14,96	66
Никель (Ni)	7,21	12,25	40
Кадмий (Cd)	0,18	0,39	1
Мышьяк (As)	7,47	5,56	5
Ртуть (Hg)	0,04	0,09	2,1
Свинец (Pb)	9,62	13,07	65
ГХЦГ/НСН	0,005	0,005	0,1
ДДТ/DDT	0,05	0,05	0,1
Метафос/Metaphos	0,004	0,004	**
Фосфамид/Phosphamide	0,03	0,03	**
Карбофос/Karbofos	9,02	0,02	2,0
Cs137	3,10	4,02	6 ±10 %
K40	349,00	350,92	610 ±45 %
Th232	22,00	20,12	30 ±30 %
Ra222	15,00	19,63	25 ±45 %

Примечание: \* – Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041–06, ГН 2.1.7.2511–09; \*\* – ПДК и ОДК в почве и подземных водах на нормативном уровне не установлены; \*\*\* – нет данных; \*\*\*\* – ФГБУ ГЦАС «Сахалинский».

Note: \* are the hygienic standards HS 2.1.7.2041–06, HS 2.1.7.2511–09; \*\* the MPC and APC in soil and in underground waters are not determined at the specified level; \*\*\* – not available; \*\*\*\* – «Sakhalinsky».

лей и химических компонентов: рН, нитратов, элементарной серы, меди, цинка, кадмия, никеля, свинца, ртути, мышьяка, цезия-137, калия-40, тория-232, радия-226. Также проводилось опробование почв и грунтов на содержание пестицидов хлорорганической и фосфорорганической группы, фенолов и нефтеуглеводородных соединений. Содержание в почвах тяжёлых металлов, элементарной серы и мышьяка определялось для валовой формы. Значения фоновых концентраций элементов из образцов с обследованной территории определялись по данным агрохимических обследований, выполненных в 2012 г. Федеральным государ-

ственным бюджетным учреждением государственным центром агрохимической службы «Сахалинский» (табл. 5).

#### Растительность

В соответствии с последними корректировками геоботанического районирования А.И. Толмачева [11], выполненными в работе П.В. Крестова с соавторами, район изысканий занимает северо-западную часть Западно-Сахалинского района [12].

Лесообразующие породы в растительном покрове – *пихта сахалинская* (*Abies sachalinensis*) и *ель аянская* (*Picea ajanensis*) – образуют древостой I–II ярусов. Елово-пихтовые леса с преобладанием ели в районе исследований занимают позиции, ослабленные антропогенным воздействием и пирогенной дегрессией. Лиственничные леса занимают ограниченные площади, преимущественно на слабо дренированных равнинных участках, местами в горах встречаются небольшие пятна лиственничников с кедровым стлаником, что хорошо видно на космических снимках [12].

Травяной ярус густой или средней густоты из мелкотравья (мелкотравье – 10–12 см травы: майник двулистный и камчатский, дерен канадский, ветреница слабая, вальштейния тройчатая, копытень гетеротрофный, линнея северная, щитовник Линнея, осоки лесные, ожика волосистая и рыжеватая, кислица обыкновенная, подмаренник камчатский и северный и т. д.) и редкий из щитовника амурского, чистосуа коричневого и других трав. Местами по валежникам в основном зеленые мхи.

Повсеместно в горах широко представлен пояс каменоберезников из *Betula ermanii* с бамбучками.

В долинах рек развиты припойменные леса из чозении, ив, тополя и ольхи, с кустарниками и крупнотравьем, иногда с участием *Acer mayrii* и *Ulmus japonica*.

В ходе инженерно-экологических изысканий на территории были выделены группы агроландшафтов:

1. Группа заброшенных сельскохозяйственных угодий, использовавшихся ранее для выращивания многолетних трав – клевера гибридного, розового (*Trifolium hybridum*), лугового (*Trifolium pratense*), ползучего (*Trifolium repens*), костера острого (*Bromus*), мятлика лугового (*Poa pratensis*), овсяницы (*Festuca pratensis*) и др.

Обнаружено, что на момент изысканий помимо перечисленных выше видов растений на полях развивается комплекс сорной растительности, в котором в качестве фоновых выделяются виды: ежа сборная (*Dactylis glomerata*) и тимopheвка луговая (*Phleum pratense*). На избыточно увлажненных полях, примыкающих к пойме, формируется комплекс растительности, в котором фоновыми видами являются вейники, в первую очередь вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*) и тростник южный, обыкновенный (*Phragmites australis*). На границах таких полей со стороны поймы происходит разрастание ольховника Максимовича (*Dusche-*

*kia maximowiczii*), бузины Микеля (*Sambucus miquilliana*), различных ив (*Salix*), прежде всего ивы поронайской (*Salix taraiensis*), ивы козьей (*Salix caprea*) и ивы удской (*Salix udensis*).

2. Агроландшафты пойменных и надпойменных лугов, которые использовались ранее как покосы, характеризуются интенсивным формированием комплекса высокотравья из белокопытника широкого (*Petasites amplus*), дудника преломленного (*Angelica genuflexa*), медвежьего (*Angelica ursine*), Максимовича (*Angelica maximowiczii*), либо комплекса кустарников (по большей части на границах луга и леса) из рябинника рябинолистного (*Sorbarias orbifolia*), таволги иволистной (*Spiraea salicifolia*), таволги берёзолистной (*Spiraea betulifolia*).

Поляны и опушки, находящиеся на возвышенных и сухих местах, отличаются травяным покровом из однолетних и многолетних трав, среди которых фоновыми видами являются: лопух малый (*Arctium minus*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), лагедиум сибирский (*Lagedium sibiricum*), несколько видов осоки (*Carex*), Иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*), кипрей Максимовича (*Epilobium maximowiczii*), шиповник иглистый (*Rosa acicularis*). На таких участках нередко высокотравье из белокопытника широкого (*Petasites amplus*), дудника преломленного (*Angelica genuflexa*), дудника Максимовича (*Angelica maximowiczii*), борщевика шерстистого (*Heracleum lanatum*), купыря лесного (*Anthriscus sylvestris*).

На заброшенных сельскохозяйственных угодьях, испытывающих процессы заболачивания, формируется комплекс растительности, в котором фоновыми видами становятся вейники, в первую очередь вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*), тростник южный, обыкновенный (*Phragmites australis*), кипрей болотный (*Epilobium palustre*).

В пределах сельскохозяйственных угодий бывшего совхоза «Александровский» в связи с прекращением хозяйственной деятельности процессы сукцессии приобрели более интенсивный характер, нежели ранее. Это проявилось, прежде всего, в изменении режима увлажнения, заболачивании ранее осушенных участков долины, трансформации почв, с явным повышением кислотности и снижением в них органических веществ, а также ускорении процессов зарастания кустарниками и деревьями луговых пространств. Изменение структуры агроландшафтов проявляется в увеличении площадей вторичных (как правило, белоберезовых лесов) за счет снижения доли лугов и сельскохозяйственных угодий.

#### Животный мир

В зоогеографическом отношении район инженерно-экологических изысканий относится, как и вся Сахалинская область, к восточной окраине Палеарктики [13]. Остров Сахалин подразделяется на два зоогеографических участка – южный Сахалин

и Сахалинский. На территории последнего находится водосборный бассейн Большой Александровки, где во время изысканий наблюдались отдельные виды животных.

Во время маршрутных наблюдений из амфибий встречена только обыкновенная жаба; из рептилий – гадюка и живородящая ящерица, из птиц – дикуша, мохноногий сыч, рябчик, московка, гаичка, обыкновенная пищуха, длиннохвостая синица, японская овсянка, полевой жаворонок, черная ворона, большеклювая ворона; из млекопитающих – когтистая бурозубка, средняя бурозубка, дальневосточная малая бурозубка, обыкновенная белка, азиатский бурундук, азиатская лесная мышь, красная полевка.

На территории водосборного бассейна Бол. Александровки отмечаются следующие виды животных, занесенных в Красные книги России и Сахалинской области [14]: Росомаха *Gulo gulo sibirica* (Pallas, 1780), Сахалинская кабарга *Moschus moschiferus sachalinensis* (Flerov, 1929), Египетская цапля *Bubulcus ibis* (Linnaeus, 1758), Белая цапля *Egretta alba* (Linnaeus, 1758), Малый перепелятник *Accipiter gularis* (Temminck et Schlegel, 1844), Беркут *Aquila chrysaetos* (Linnaeus, 1758), Чеглок *Falco subbuteo* (Linnaeus, 1758), Дикуша *Falci pennis falci pennis* (Hartlaub, 1855), Даурский журавль *Grus vipio* (Pallas, 1811), Горный дупель *Gallinago solitaria* (Hodgson, 1831), Белая сова *Nyctea scandiaca* (Linnaeus, 1758), Егрова *Hydroprogne caspia* (Pallas, 1770), Филин *Bubo bubo* (Linnaeus, 1758), Воробьиный сыч *Glaucidium passerinum* (Linnaeus, 1758), Ястребиная сова *Surnia ulula* (Linnaeus, 1758), Бородатая неясыть *Strix nebulosa* (Forster, 1772).

#### Физико-механические свойства грунтов

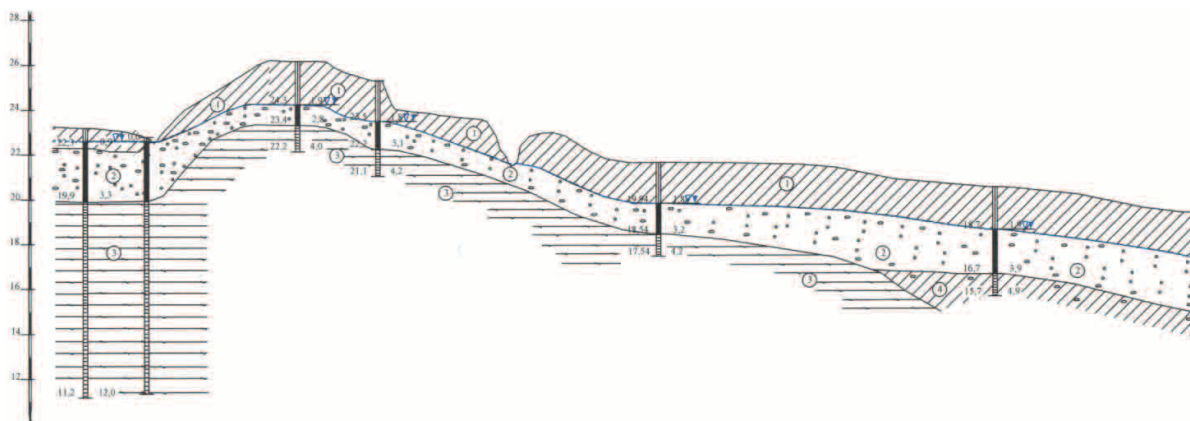
Вскрытые грунты представлены коренными полускальными неогеновыми аргиллитами и связными и несвязными грунтами четвертичного возраста.

На рис. 1–7 представлен инженерно-геологический разрез по трассе трубопровода от п. Михайловка до г. Александровск-Сахалинский. На каждом из рисунков представлен один километр трассы и разреза.

Мощность четвертичных отложений на отдельных участках составила 3–4 м (верховья долины р. Бол. Александровка), на других участках скважины глубиной 6,0 м не вскрыли коренные отложения.

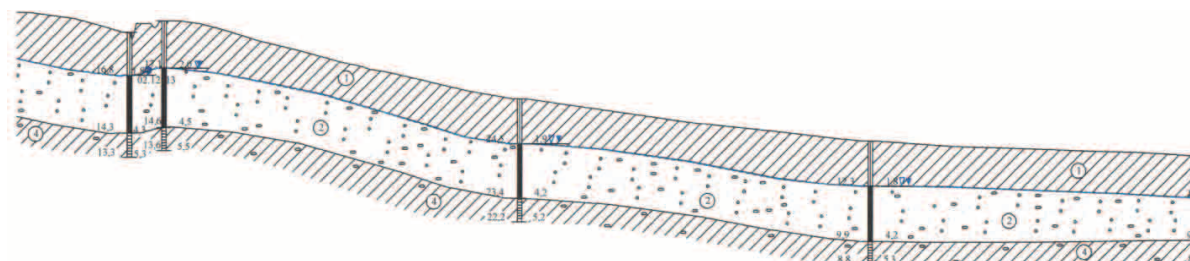
В долине реки развиты аллювиально-делювиальные отложения, представленные водонасыщенными гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем мощностью от 0,5 до 5–6 м.

Галечниковые отложения повсеместно перекрыты суглинком коричневым, тугопластичным до полутвердого на отдельных участках с дресвой, щебнем, гравием и галькой до 10–15 %. Мощность отложений от 0,9 до 3,2 м. Они также развиты на склонах и вершинах водоразделов.



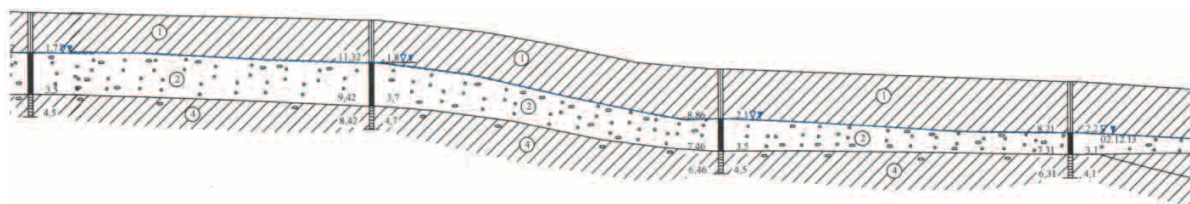
**Рис. 4.** Инженерно-геологический разрез на участке трассы 0-1 км (ПК0-ПК10). Описание инженерно-геологических элементов разреза приводится в тексте

**Fig. 4.** Engineering geological section on the part of the route 0-1 km (PK0-PK10). Description of engineering geological elements of the section is introduced in the text



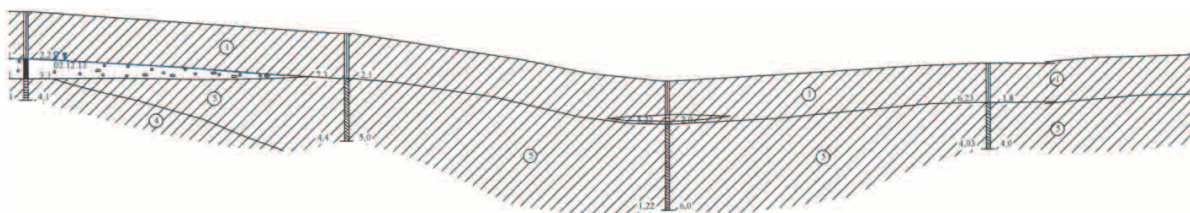
**Рис. 5.** Инженерно-геологический разрез на участке трассы 1-2 км (ПК10-ПК20)

**Fig. 5.** Engineering geological section on the part of the route 1-2 km (PK10-PK20)



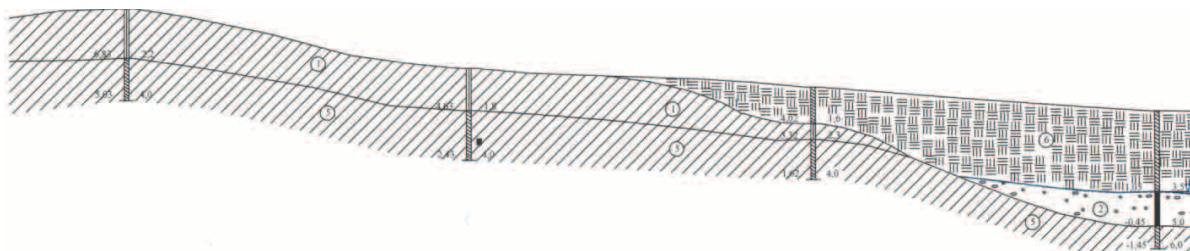
**Рис. 6.** Инженерно-геологический разрез на участке трассы 2-3 км (ПК20 - ПК30)

**Fig. 6.** Engineering geological section on the part of the route 2-3 km (PK20-PK30)



**Рис. 7.** Инженерно-геологический разрез на участке трассы 3-4 км (ПК30-ПК40)

**Fig. 7.** Engineering geological section on the part of the route 3-4 km (PK30-PK40)



**Рис. 8.** Инженерно-геологический разрез на участке трассы 4-5 км (ПК40-ПК50)

**Fig. 8.** Engineering geological section on the part of the route 4-5 km (PK40-PK50)

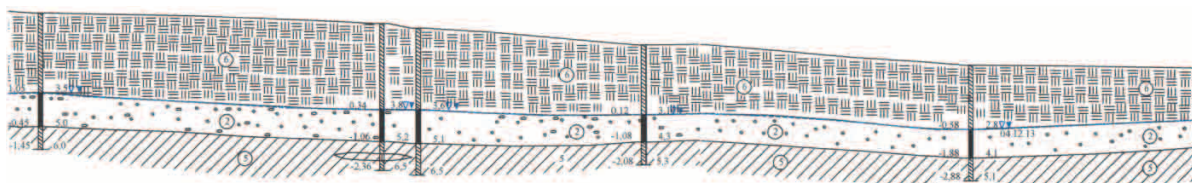


Рис. 9. Инженерно-геологический разрез на участке трассы 5–6 км (ПК5–ПК60)

Fig. 9. Engineering geological section on the part of the route 5–6 km (PK50–PK60)

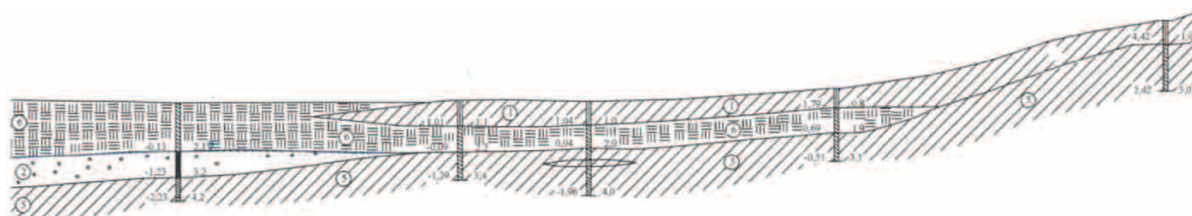


Рис. 10. Инженерно-геологический разрез на участке трассы 6–7 км (ПК60–ПК70)

Fig. 10. Engineering geological section on the part of the route 6–7 km (PK60–PK70)

В долине и в нижней части склонов вскрыт суглинок серый, мягкопластичный мощностью от 0,9 до 4,0 м, залегает в интервале глубин от 2,0 до 9,5 м.

В нижней части разрезов долин вскрыт суглинок серый, полутвердый до твердого с содержанием гравия и гальки до 20 %, вскрыт в интервале глубин от 3,1 до 15,0 м.

В районе с. Корсаковка по днищу долины развито болото с отложениями торфа мощностью до 3,8 м. Торф от сильноразложившегося до средне-разложившегося. В зимнюю межень не обводнен. Также торфяные отложения развиты в нижней части города в пойме реки и в надпойменной террасе в виде прослоев мощностью 0,8–2,2 м.

В районе п. Михайловка и на вершине водораздела на глубине 2,5–4,0 м вскрыты коренные отложения, представленные осадочными породами неогенового возраста – верхнемиоценовые аргиллиты александровской свиты.

На всей территории изысканий развиты тонкие прослой глин и супесей различной консистенции мощностью 5–10 см, которые не выделены в отдельные инженерно-геологические элементы, но хорошо согласуются с общей инженерно-геологической моделью района изысканий.

В инженерно-геологическом разрезе выделено шесть инженерно-геологических элементов:

- ИГЭ-1 – суглинок аллювиально-делювиальный, светло-коричневый, тугопластичный до полутвердого, с включениями дресвы, щебня, гравия и гальки 5–10 %. Покровный суглинок, развит на всей территории изысканий от поверхности до глубины 4,0 м. Плотность – 1,96 г/см<sup>3</sup>;
- ИГЭ-2 – галечниковый грунт с песчано-гравийным заполнителем до 30–40 %, средней плотности, водонасыщенный, мощность – от 0,5 до 5–6 м. Плотность – 2,26 г/см<sup>3</sup>;
- ИГЭ-3 – аргиллит, малопрочный, естественная влажность около 5 %, плотность – 2,07 г/см<sup>3</sup>.

Вскрыт в районе п. Михайловка и на вершине водораздела на глубине 2,5–4,0 м. Плотность – 2,07 г/см<sup>3</sup>;

- ИГЭ-4 – суглинок серый, полутвердый до твердого, с гравием и галькой до 10–20 %. Вскрыт в интервале глубин от 3,1 до 6,0 м. Плотность – 2,07 г/см<sup>3</sup>;
- ИГЭ-5 – суглинок серый, мягкопластичный, мощность – от 0,9 до 4,0 м, залегает в интервале глубин от 2,0 до 9,5 м. Плотность – 1,82 г/см<sup>3</sup>;
- ИГЭ-6 – торф, от средне-разложившегося до сильноразложившегося. Естественная влажность – от 62 до 182 %, плотность – 1,20–1,62 г/см<sup>3</sup>. Глубина залегания: от дневной поверхности до 3,8 м. Плотность – 1,33 г/см<sup>3</sup>.

Большая часть долины р. Бол. Александровка отнесена нами к денудационным поверхностям выравнивания с увалистым рельефом, образованным при медленном небольшом поднятии днища грабена. Денудационные поверхности срезают миоценовые и плиоценовые осадки и деформированы более поздними неотектоническими проявлениями.

Изменчивость инженерно-геологических элементов и их характеристик обусловлена характером экзогенного воздействия и составом материнских пород. Так, появление гравийно-галечных отложений (ИГЭ-2) связано с разрушением более древних конгломератов из толщ неогеновых (сертунайская, верхнедуйская свиты) и мезозойских отложений. Суглинок серый, полутвердый до твердого с гравием и галькой (ИГЭ-4) сформировался из пород сертунайской свиты, а суглинок серый, мягкопластичный, практически без грубых примесей (ИГЭ-5) является продуктом диагенеза светло-серых, желтоватых аргиллитов маруямской свиты.

Появление мощных торфяных отложений обусловлено подпором морскими водами весеннего стока и, соответственно, разливом и подтоплением

низкой поверхности выравнивания в приморской части долины, формированием болот и, как следствие, болотистых отложений (ИГЭ-6).

#### Инженерно-геологическое районирование трассы

В пределах территории трассы выделяется пять участков со свойственным для каждого участка набором характеристик инженерно-геологических условий.

1. Находится в районе п. Михайловка, от ПК0 до ПК7. Для него характерно неглубокое залегание коренных пород – малопрочного аргиллита (ИГЭ-3) в интервале глубин 3–4 м. На аргиллитах залегает обводненный слой галечниковых отложений с гравийно-песчаным заполнителем мощностью 1–2 м (в районе водозабора, в русле р. Бол. Александровка, его мощность достигает 5–6 м). Водоносный горизонт, развитый по галечнику – безнапорный. Верхняя часть разреза перекрыта коричневым, тугопластичным суглинком мощностью 1–2 м. Поверхность рельефа долины несколько расчленена и имеет заметный уклон в направлении устья, отметки высот изменяются от 26,2 до 21,0 м.

В районе ПК7 коренные аргиллиты замещаются суглинком серым, полутвердым до твердого с гравием и галькой. Эта смена пород выражена в рельефе едва заметным общим понижением и переходом рельефа в более спокойное состояние.

2. Начинается от ПК7 и продолжается до ПК30. На этом участке долина реки расширяется до 2,0–2,5 км, днище долины выровненное, с плавным понижением в сторону устья от 21,0 до 9,5 м. Верхняя часть разреза аналогична разрезу первого участка – суглинок тугопластичный (ИГЭ-1) и галечник с песчано-гравийным заполнителем, водонасыщенный (ИГЭ-2). Отличие от первого участка имеется в нижней части разреза, которая представлена суглинком серым, полутвердым до твердого с гравием и галькой (ИГЭ-4). Водоносный горизонт (в ИГЭ-2) также безнапорный.

В районе тридцатого пикета наблюдается значительное изменение инженерно-геологического разреза: в верхней части сохраняется покровный суглинок (ИГЭ-1), а в средней и нижней частях галечник (ИГЭ-2) и полутвердый суглинок (ИГЭ-4) замещаются на суглинок серый, мягкопластичный (без включений) – ИГЭ-5.

3. Выделяется от ПК30 до ПК46. В пределах участка русло реки приближается к правому борту долины. Отметки высот изменяются от 9,5 до 6,0 м. Рельеф ровный, с небольшими врезами ручьев. Инженерно-геологический разрез представлен двумя элементами: в верхней части – суглинок коричневый, тугопластичный (ИГЭ-1), мощностью 1,8–2,2 м, в нижней – суглинок серый, мягкопластичный (ИГЭ-5).

Аналогичные условия также встречены в районе ПК67–ПК70.

В районе сорок шестого пикета отмечается кардинальная перестройка верхней части разреза: суглинок тугопластичный (ИГЭ-1) полностью замещается торфом (ИГЭ-6) и галечником (ИГЭ-2). В нижней части сохраняется суглинок мягкопластичный (ИГЭ-5).

4. Выделен от ПК46 до ПК63. В верховьях участка русло реки делает резкий поворот на запад и далее течет вплотную к левому борту долины. Днище долины относительно ровное и плоское, со слабым уклоном к центральной части участка, с отметками высот от 6,0 м по краям до 2,0 м в центре. Заболочено. Развита мощные торфяные отложения. Инженерно-геологический разрез представлен тремя элементами: в верхней части – торф, от среднеразложившегося до сильно разложившегося, мощность до 3,8 м, ниже – галечник с песчано-гравийным заполнителем, водонасыщенный (ИГЭ-2), мощность до 1,5 м, в основании – суглинок серый, мягкопластичный (ИГЭ-5).

На осушенной прирусловой части долины расположен п. Корсаковка. В районе шестидесяти третьего пикета галечниковый слой полностью выклинивается, а верхняя часть торфяника замещается суглинком коричневым, тугопластичным.

5. Выделяется от ПК63 до ПК67. Рельеф спокойный, ровный, выдержан в районе отметки 2,0 м. В инженерно-геологическом разрезе выделено три элемента: от 0 до 1,1 м – суглинок коричневый, тугопластичный (ИГЭ-1), от 1,0 до 2,2 м – торф, от среднеразложившегося до сильно разложившегося (ИГЭ-6), в нижней части – суглинок серый, мягкопластичный (ИГЭ-5).

По результатам детального сейсмического районирования для всего района исследований фоновая (исходная) сейсмичность определена в 8 баллов, для средних грунтовых условий (II категория грунтов по сейсмическим свойствам) для объектов нормального и повышенного уровня ответственности (карты А, В) (приказ № 104–1 от 14.12.2007 г. департамента строительства Сахалинской области).

#### Обсуждение результатов

В процессе исследования были выявлены характерные черты природных условий и особенности современного состояния экосистем территории, а также определены инженерно-геологические условия долины р. Бол. Александровка

По результатам выполненных исследований выявлены сложные инженерно-геологические условия (III категория, СП 11–105–97, приложение Б), обусловленные высокой сейсмичностью района (8–9 баллов), наличием специфических грунтов и водоносных горизонтов.

К специфическим грунтам относятся торфяные отложения (ИГЭ-6).

По пучинистости в зоне сезонного промерзания к среднепучинистым относится суглинок тугопластичный (ИГЭ-1) и сильно пучинистым – суглинок мягкопластичный (ИГЭ-5).



В пределах территории исследований выделено пять участков с характерным комплексом инженерно-геологических условий для каждого участка.

К неблагоприятным процессам относятся: высокая сейсмичность (8–9 баллов), развитие специфических грунтов (торф), пучинистость грунтов, заболачиваемость, подтопление, сезонные паводки, донная и боковая эрозия русла р. Бол. Александровка.

Выявленный перерыв в аллювиальных отложениях между пикетами 31–47 обусловлен, по-видимому, промыванием рекой нового спрямленного русла при стоке с более высокой террасы, с уровнем бровки на высоте 12 м, на более низкую, с уровнем поверхности 4–6 м над уровнем моря. Результат прорыва реки хорошо прослеживается на космических снимках. Образование низкой морской террасы абразионно-аккумулятивного генезиса связано с послеледниковой трансгрессией, произошедшей около 7–9 тыс. л. н., когда море уходило вглубь долины р. Бол. Александровка на 5–7 км [5].

Особенности формирования террас с уровнями поверхностей 12–15 м изучались ранее другими

исследователями, которые объясняли их генезис колебаниями уровня океана при значительной гляциоэвстатической трансгрессии позднплейстоценового возраста [15–19]. Формирование нижней денудационной поверхности отнесено С.М. Александровым к раннему плейстоцену, им отмечалось срезание ею верхнеплиоценовых отложений [3].

#### Заключение

Выявлено, что начиная с верхнеплиоценового времени днище долины р. Бол. Александровка было подвержено процессу устойчивого поднятия. Аналогичные процессы протекали на северо-восточном шельфе Сахалина [20, 21]. Направленность и развитие современных процессов на каждом конкретном участке шельфа зависит от его структурной приуроченности и соответствующего состояния эндогенных факторов, а объемы поступающего материала и его перемещение обеспечивают экзогенные факторы. Морфолитодинамические особенности современных процессов для шельфовых зон Сахалина установлены в процессе комплексных исследований в данном районе [22, 23].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ч. 1–6. Вып. 34 / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. Сахалинская область. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 350 с.
2. Геология СССР. Том XXXIII. Остров Сахалин. Геологическое описание / С.Н. Алексейчик, В.Н. Верещагин, Д.П. Жижин, Ю.М. Ковтунович, И.М. Сирьк, А.Я. Таболяков, И.И. Тютрин, И.К. Туезов / под ред. В.Н. Верещагина. – М.: Недра, 1970. – 432 с.
3. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Ю.Б. Гладенков, О.К. Баженова, В.И. Гречин, Л.С. Маргулис, В.А. Сальников. – М.: ГЕОС, 2002. – 225 с.
4. Morley J.J., Nigrini C. Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific sites 881, 884, 885, 886, and 887 // Proc. DDP. Sci. Results. – 1992. – V. 145. – P. 55–91.
5. Александров С.М. Остров Сахалин. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. – М.: Наука, 1973. – 183 с.
6. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР 1:7500000. Т. III. Триасовый, юрский и меловой периоды / гл. ред. А.П. Виноградов, ред.: В.Н. Верещагин, А.Б. Ронов и др. – М.: ГУГК, 1968. – 74 л.
7. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР 1:7500000. Т. IV. Палеогеновый, неогеновый и четвертичный периоды / гл. ред. А.П. Виноградов; ред.: В.А. Гроссгейм, В.Е. Хаин и др. – М.: ГУГК, 1967. – 57 л.
8. Тихонович Н.Н., Полевой П.И. Геоморфологический очерк русского Сахалина. – Пг., Геол. ком., 1915. – 77 с.
9. Климат Александровска-Сахалинского // Погода и климат. 2004–2015. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/32061.htm> (дата обращения: 26.10.2015).
10. Агрохимический паспорт совхоза «Александровский». – Южно-Сахалинск: ФГБУ ГЦАС «Сахалинский», 2013. – 7 с.
11. Толмачёв А.И. Геоботаническое районирование острова Сахалина. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. – 77 с.
12. Крестов П.В., Баркалов В.Ю., Таран А.А. Ботанико-географическое районирование острова Сахалин / Растительный и животный мир острова Сахалин: Матер. Междунар. сахалинского проекта. Т. 1. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – С. 67–90.
13. Атлас Сахалинской области. – М.: ГУГК, 1967. – 136 с.
14. Красная Книга Сахалинской области: животные. – Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2001. – 190 с.
15. Каплин П.А., Поротов А.В. Изменения климата в позднем голоцене и развитие морских берегов Черного моря // Геоморфология. – 2012. – № 4. – С. 64–72.
16. Holocene development and geomorphic processes at Omnsbreen, southern Norway: Evidence for glacier-permafrost interactions / K.S. Lilleoren, O. Humlum, A. Nesje, B. Eitzelmler // The Holocene. – 2013. – № 23 (6). – P. 796–809.
17. Jolivet L., Tamaki K. Neogen Kinematics in the Japan Sea Region and volcanic activity of the North-east Japan Arc // Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. – Texas A&M University, 1992. – V. 127/128, Pt. 2. – P. 1311–1327.
18. Woodroffe S.A., Horton B.P. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific // Journal of Asian Earth Sciences. – 2005. – V. 25. – Iss. 1. – P. 29–43.
19. Contrasted sediment processes and morphological adjustments in three successive cutoff meanders of the Danube delta / L.T. Dutu, M. Provansal, J. Le Coz, F. Dutu // Geomorphology. – 2014. – V. 204. – P. 154–164.
20. Ильин В.В. Эндогенные и экзогенные факторы в процессах эрозии, переноса и аккумуляции осадков на северо-восточном шельфе острова Сахалин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 17–22.
21. Куделькин В.В., Ильин В.В., Савицкий В.О. Несогласия в осадочном чехле Охотского моря / Вторая тихоокеанская школа по морской геологии и геофизике. – Южно-Сахалинск, 13–15 сентября 1985. – Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВНЦ АН СССР, 1985. – С. 41–42.
22. Мелкий В.А. Теоретические основы и принципы построения единой системы мониторинга природной среды и техносферы / Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 2. – С. 89–97.
23. Математическое моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива / В.М. Пищальник, А.В. Леонов, В.С. Архипкин, В.А. Мелкий. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. – 104 с.

Поступила 27.10.2015 г.

UDC 551.4.02:551.3.051

## RESULTS OF STUDIES OF NATURAL CONDITIONS AND ENGINEERING-GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE VALLEY OF THE RIVER BOLSHAYA ALEKSANDROVKA (SAKHALIN ISLAND)

**Vyacheslav A. Melkiy,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: vamelkiy@mail.ru

**Vladimir V. Ilin,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: vladimirilyin7@gmail.com

**Vladimir M. Pishchalnik,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: vpishchalnik@rambler.ru

**Valeriy A. Sakharov,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: sakhsakh@yandex.ru

**Nikolay S. Semenov,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: Proverka05@mail.ru

**Sergey M. Pervukhin,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: pervuhin.sergey1961@yandex.ru

**Aleksey A. Verkhoturov,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: ussr-91@mail.ru

**Yana P. Belyanina,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: yana-b@inbox.ru

**Irina V. Eremenko,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: IrinkaEremenko@yandex.ru

**Oleg M. Zaripov,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: ole-zaripov@mail.ru

**Aleksey A. Galtsev,**

Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: galts.alexey@gmail.com

*The relevance of the discussed issue is caused by the need of precise ideas about the structure of the upper part of geological section, based on understanding of sediments genesis for use as engineering geological support of construction in the study area.*

**The main aim** of the study is to identify engineering-geological conditions in the valley of river Bolshaya Aleksandrovka according to the results of engineering surveys and determination of features of formation of the Neogene-Quaternary deposits of the territory.

**The methods used in the study:** methods of engineering-geological researches: surface observation, drilling; complex laboratory methods for determining physico-mechanical properties of rocks: determination of granulometric composition of cohesive and non-cohesive sedimentary rocks, density and bulk density calculation of porosity, moisture content and the maximum molecular moisture capacity, plasticity, stickiness, swelling and other; methods for determining petrophysical properties of igneous rocks: density, bulk density, water saturation, water absorption, humidity, capillary rise, porosity, strength and elastic properties; geophysical methods of vertical electrical sounding and seismic exploration by the method of refracted waves; direct methods of correlation of ground sections, based on the study of cores and the mapping of columns in different wells; stratigraphic method.

**The results:** As a result of geological engineering survey the authors have compiled geological section of seven kilometers to the bottom of the valley of the river Bolshaya Aleksandrovka, located in the central part of Sakhalin island. The conditions of formation of the up-

per part of the section were identified and engineering-geological elements and their spatial position were selected. The authors zoned the valley territory by the totality of sediments characteristics and variability of the individual parameters in different parts of the section. It was ascertained that since the Upper Pliocene time the bottom of the valley of river Bol. Aleksandrovka was subjected to sustainable lift. The authors determined the break in the alluvium between stations 31–47, which is caused by the washing of a new straightened river channel at the runoff from higher terraces, with edge level on the height of 12 m, to a lower one, with the surface level of 4–6 m above sea level. The formation of the lowest marine terraces of abrasion-accumulative genesis is associated with post-glacial transgression, occurred near 7–9 ka BP, when the sea went inward into the valley of Bol. Aleksandrovka on 5–7 km. Formation of terraces with surface level of 12–15 m can be explained by the ocean level rise at significant glacioeustatic transgressions in Late Pleistocene.

**Key words:**

Engineering-geological surveys, space remote sensing, endogen factor and exogenous factors, erosion, accumulation, sediment transporting.

**REFERENCES**

1. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR* [Scientific-applied handbook on climate of the USSR]. B. 1–6. Iss. 34. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 350 p.
2. Alekseychik S.N., Vereshchagin V.N., Zhizhin D.P., Kovtunovich Yu.M., Siryk I.M., Taboyakov A.Ya., Tyutrin I.I., Tuzov I.K. *Geologiya SSSR. Tom XXXIII. Ostrov Sakhalin. Geologicheskoe opisaniye* [Geology of the USSR. V. XXXIII. The Sakhalin Island. Geological description]. Ed. by V.N. Vereshchagin. Moscow, Nedra Publ., 1970. 432 p.
3. Gladenkov Yu.B., Bazhenova O.K., Grechin V.I., Margulis L.S., Salnikov B.A. *Kaynozoy Sakhalina i ego neftegazonosnost* [The Cenozoic of Sakhalin and its oil and gas potential]. Moscow, GEOS Publ., 2002. 225 p.
4. Morley J.J., Nigrini C. Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific sites 881, 884, 885, 886, and 887. *Proc. DDP. Sci. Results*, 1992, vol. 145, pp. 55–91.
5. Aleksandrov S.M. *Ostrov Sakhalin. Istoriya razvitiya relefa Sibiri i Dalnego Vostoka* [The Sakhalin Island. The history of development of relief of Siberia and the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 183 p.
6. *Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR 1:7500000. T. III. Triasovy, yurskiy i melovoy periody* [Atlas of lithological-paleogeographical maps of the USSR 1:7500000. V. III. Triassic, Jurassic and Cretaceous periods]. Ed. by A.P. Vinogradov, V.N. Vereshchagin, A.B. Ronov. Moscow, GUGK Press, 1968. 74 p.
7. *Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR 1:7500000. T. IV. Paleogenovy, neogenovy i chetvertichny periody* [Atlas of lithological-paleogeographical maps of the USSR 1:7500000. V. IV. Paleogene, Neogene and Quaternary periods] Ed. by A.P. Vinogradov, V.A. Grossgeym, V.E. Khain. Moscow, GUGK Press, 1967. 57 p.
8. Tikhonovich N.N., Polevoy P.I. *Geomorfologicheskii ocherk ruskogo Sakhalina* [Geomorphological sketch of the Russian Sakhalin]. Petrograd, Geological Committee, 1915. – 77 p.
9. *Klimat Aleksandrovskaya-Sakhalinskogo* [Climate of Aleksandrovsk-Sakhalinsky]. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. 2004–2015. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/32061.htm> (accessed 26.10.2015).
10. *Agrohimicheskii passport sovhoza «Aleksandrovskiy»* [Agrochemical passport of the farm «Aleksandrovskiy»]. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalinskiy Publ., 2013. 7 p.
11. Tolmachev A.I. *Geobotanicheskoe rayonirovaniye ostrova Sakhalin* [Geobotanical zonation of Sakhalin island]. Moscow, Leningrad: Academy of Sciences of the USSR Publ., 1955. 77 p.
12. Krestov P.V., Barkalov V.Yu., Taran A.A. *Botaniko-geograficheskoe rayonirovaniye ostrova Sakhalin* [Botanical-geographic zoning of Sakhalin island]. *Rastitelnyy i zhivotnyy mir ostrova Sakhalin. Materialy Mezhdunarodnogo sakhalinskogo proekta* [Flora and fauna of Sakhalin island. Materials of International Sakhalin project]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2004. Vol. 1, pp. 67–90.
13. *Atlas Sakhalinskoy oblasti* [Atlas of Sakhalin region]. Moscow, GUGK Publ., 1967. 136 p.
14. *Krasnaya Kniga Sakhalinskoy oblasti: zhivotnyye* [The Red Book of the Sakhalin region: animals]. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin book publishing house, 2001. – 190 p.
15. Kaplin P.A., Porotov A.V. *Izmeneniya klimata v pozdnem golotsene i razvitiye morskikh beregov Chernogo morya* [Climate change in the late Holocene and the development of marine coasts of the Black sea]. *Geomorfologiya*, 2012, no. 4, pp. 64–72.
16. Lilleoren K.S., Humlum O., Nesje A., Etzelmüller B. Holocene development and geomorphic processes at Omnsbreen, southern Norway: Evidence for glacier-permafrost interactions. *The Holocene*, 2013, no. 23(6), pp. 796–809.
17. Jolivet L., Tamaki K. Neogen Kinematics in the Japan Sea Region and volcanic activity of the North-east Japan Arc. *Proc. of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. – Texas A&M University, 1992. – V. 127/128, Pt. 2. – P. 1311–1327.
18. Woodroffe S.A., Horton B.P. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, vol. 25, Iss. 1, pp. 29–43.
19. Dutu L.T., Provansal M., Le Coz J., Dutu F. Contrasted sediment processes and morphological adjustments in three successive cutoff meanders of the Danube delta. *Geomorphology*, 2014, vol. 204, pp. 154–164.
20. Ilin V.V. *Endogennyye i ekzogennyye faktory v protsessakh erozii, perenosu i akkumulatsii osadkov na severo-vostochnom shelfe ostrova Sakhalin* [Endogenous and exogenous factors at sediment erosion, transporting and accumulation in the north-east shelf of Sakhalin island]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 17–22.
21. Kudelkin V.V., Ilin V.V., Savitskiy V.O. *Nesoglasiya v osadochnom chekhle Okhotskogo morya* [Disagreement in the sedimentary cover of the Sea of Okhotsk]. *Vtoraya tikhookeanskaya shkola po morskoy geologii i geofizike* [The second Pacific School on marine Geology and Geophysics]. Yuzno-Sakhalinsk, 13–15 September 1985. Yuzno-Sakhalinsk, Institute of marine Geology and Geophysics of the FESC of the USSR, 1985. pp. 41–42.
22. Melkiy V.A. *Teoreticheskie osnovy i printsipy postroeniya edinoy sistemy monitoringa prirodnoy sredy i tekhnosfery* [Theoretical foundations and principles of the United system of monitoring of the Environment and the Technosphere]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2002, no. 2, pp. 89–97.
23. Pishchalnik V.M., Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Melkiy V.A. *Matematicheskoe modelirovaniye usloviy funktsionirovaniya ekosistemy Tatarskogo proliva* [Mathematical modeling of functioning of Strait of Tartary ecosystem]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhalGU Publ., 2011. 104 p.

Received: 27 October 2015.

УДК 550.83+550.43+551.86

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СТРАТИГРАФИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ НИЖНЕСРЕДНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

**Мельник Игорь Анатольевич,**

д-р геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией интерпретации материалов геофизических исследований скважин ТФ ФГУП «СНИИГ-ГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: migranis@mail.ru

**Смирнова Ксения Юрьевна,**

заведующая лабораторией геологического моделирования ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: smirnova86@sibmail.com

**Зими́на Светлана Валериевна,**

канд. геол.-минерал. наук, руководитель отдела геологии нефти и газа ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: pochta@tf-sniiggims.ru

**Жданова Анастасия Владимировна,**

ведущ. инженер лаборатории геологического моделирования ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: JAV2004@rambler.ru

**Елисеева Ольга Дмитриевна,**

ведущ. инженер лаборатории геологического моделирования ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: eliseevaod@tf-sniiggims.ru

**Шеламова Евгения Владимировна,**

ст. науч. сотр. лаборатории геологического моделирования ТФ ФГУП «СНИИГГиМС», Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232. E-mail: Shelamova-e-w@yandex.ru

*Актуальность работы связана с государственной задачей увеличения прироста запасов углеводородного сырья и плохой геологической изученностью нижнесреднеюрских отложений юго-востока Западной Сибири.*

**Цель исследования** заключена в комплексном изучении геологического строения отложений нижнесреднеюрского возраста на территории Томской области, а также в определении перспективных нефтегазоносных зон, обусловленных вторичными процессами.

*В работе использованы традиционные методы литологического и стратиграфического расчленения разрезов скважин по материалам каротажных диаграмм, результаты петрографического анализа шлифов зерна на основании «Дел скважин», а также инновационная технология статистической интерпретации материалов геофизических исследований скважин на предмет выявления низкоомных УВ-насыщенных коллекторов и интенсивностей вторичных геохимических процессов.*

*Представлены результаты обобщения геологического строения и стратиграфии нижнесреднеюрских отложений Томской области. Выделены нефтегазовые комплексы (НГК), и на основе эмпирических данных показана перспективность в образовании УВ залежей каждого НГК. По результатам инновационной интерпретации материалов геофизических исследований скважин определены интенсивности вторичных процессов и вероятность образования низкоомных УВ-насыщенных коллекторов. Определены наиболее перспективные площади их проявления в нижнесреднеюрских отложениях.*

**Выводы.** Во-первых, наиболее перспективными НГК в нижнесреднеюрских отложениях Томской области являются надояхский и мальшевский комплексы, при условии обнаружения флюидоупоров и ловушек. Во-вторых, наиболее перспективные площади (с точки зрения обнаружения низкоомных УВ-насыщенных пластов) находятся на территориях межструктурных зон либо близко расположенных к ним. В-третьих, корреляции по латерали между выборками усредненных (по разрезу) данных интенсивностей каолинизации с низкоомным параметром, карбонатизации и пиритизации с пористостью позволяют выявить режимы формирования либо разрушения залежей УВ.

### **Ключевые слова:**

*Стратиграфия, трансгрессивно-регрессивные горизонты нижнесреднеюрских отложений, каротаж скважин, низкоомный коллектор, углеводороды, вторичный геохимический процесс.*

Поиски месторождений нефти и газа в континентальных отложениях Западно-Сибирской плиты начаты в 50–60 гг. прошлого века. Многие ис-

следователи, такие как Ф.Г. Гурари, А.Э. Конторович, Ю.К. Миронов, Н.Н. Ростовцев, обращали свое внимание на высокий генерационный потен-

циал этих отложений и необходимость поиска нетрадиционных нефтегазоперспективных объектов в пролювиально-аллювиальных отложениях нижнесреднеюрского возраста.

На территории Западной Сибири формирование базальных горизонтов осадочного чехла происходило за счёт разрушения местных источников сноса и переноса осадков в палеодепрессии. Данные глубокого бурения подтверждают наличие условий для подобного формирования осадков в юго-восточной части Западной Сибири в течение ранней юры и большей части аалена, на что указывает тот факт, что геттанг-ааленские отложения представлены в основном слабосортированными грубообломочными породами пролювиально-аллювиального генезиса, в которых грубообломочная часть представлена теми же породами, что и близлежащие выступы доюрского основания.

Нижне-среднеюрские отложения представляют собой циклично построенную толщю закономерного чередования регрессивных горизонтов преимущественно песчаного и трансгрессивных – глинистого состава. Такая цикличность обусловлена одновременными колебаниями уровня сибирских морей и в основных чертах совпадает с колебаниями уровня Мирового океана [1–3]. Трансгрессивно-регрессивные уровни в Западной Сибири рассматриваются как самостоятельные стратиграфические подразделения – горизонты, что запечатлено в последних стратиграфических схемах. Регрессивно-трансгрессивные горизонты составляют гидродинамически самостоятельные резервуары, регрессивный из которых является коллектором, трансгрессивный – флюидоупором. Это позволяет рассматривать данные стратиграфические подразделения в статусе нефтегазоносных комплексов (НГК) отложений (рис. 1) [4, 5].

В пределах Западной Сибири в разрезе континентальных отложений нижней-средней юры выделяются пять нефтегазоносных комплексов (сверху вниз): малышевский, вымский, надояхский, шараповский, зимний [6]. Последние два в пределах Томской области развиты ограниченно. Каждый комплекс состоит из толщи проницаемых пород (резервуара) и регионального глинистого флюидоупора. Над зимним резервуаром лежит левинский флюидоупор, над шараповским – китербютский, над надояхском – лайдинский, над вымским – леонтьевский экран, над малышевском – глины нижневасюганской свиты.

В пределах восточной территории Томской области отложения, соответствующие по возрасту зимнему, левинскому, шараповскому горизонтам, сильно сокращены по мощности ввиду их близости к обрамлению ЗСП и континентального генезиса. Вероятнее всего, здесь на ранних этапах формирования нижнеюрского осадочного бассейна проходили процессы, как аккумуляции, так и денудации, особенно характерные для нижней части разреза, что привело к сокращению толщин осадков и практически отсутствию глинистых отложений левинской трансгрессии, влияние которой на седиментогенез оказалось минимальным. В связи с тем, что достоверно выделить объемы вышеперечисленных горизонтов в разрезах скважин невозможно, они рассматриваются как единый регрессивный цикл – шараповский+зимний.

В условиях континентального генезиса нижнесреднеюрских отложений не наблюдается четко выраженных особенностей регрессивных циклов, включающих резервуары, и трансгрессивных, формирующих глинистые покрывки. В случаях слабовыраженных региональных покрывок нефтегазоносный комплекс практически теряет

ВОЗРАСТ МЛН. ЛЕТ И.И. Нестеров, В.И. Шильников	СИСТЕМА (период)	ОТДЕЛ (эпоха)	ЯРУС (век)	Нефтегазоносные комплексы (НГК)	ГОРИЗОНТ	СВИТА			ИНДЕКС ОПОРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ	ИНДЕКС РЕПЕРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ	НЕФТЕГАЗОНОСНЫЙ ПЛАСТ Т.Ф.Ф.Г.П.С.НИИГТ.МС	Стратиграфическая схема (МРСС, 2004г.)															
						ОБЪ-ГАЗОВАЯ ФАЦИАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ	ОБЪ-ИРТЫШСКАЯ ФАЦИАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ	ИТАТСКАЯ																			
155	ЮРСКАЯ, J	СРЕДНИЙ J <sub>2</sub>	ОКСФОРД J <sub>3o</sub>	МАЛЫШЕВСКИЙ	ВАСЮГАНСКИЙ НИЖНИЙ	ВАСЮГАНСКАЯ	ВАСЮГАНСКАЯ	ВАСЮГАНСКАЯ	I <sup>b</sup>	T																	
160,1			БАТСКИЙ J <sub>2bt</sub>		МАЛЫШЕВСКИЙ	ТЮМЕНСКАЯ							ТЮМЕНСКАЯ	ИТАТСКАЯ				Ю <sub>2-6</sub>	У <sub>2-5</sub>								
165,5			БАЙОССКИЙ J <sub>2b</sub>		ЛЕОНТЬЕВСКИЙ															ВЫМСКИЙ	ВЫМСКИЙ				T <sub>1</sub>	Ю <sub>7-10</sub>	У <sub>6-9</sub>
170,5			ААЛЕНСКИЙ J <sub>2a</sub>		ВЫМСКИЙ																						
175,5			ТОАРСКИЙ J <sub>1t</sub>		НАДОЯХСКИЙ															САЛАТСКАЯ	ШАРАПОВСКИЙ	ТОГУРСКАЯ	ТОГУРСКАЯ			T <sub>3</sub>	Ю <sub>15</sub>
180,3		ПЛИНСБАХ J <sub>1p</sub>	НАДОЯХСКИЙ	САЛАТСКАЯ	КИТЕРБЮТСКИЙ	ЗИМНИЙ	УРМАНСКАЯ	УРМАНСКАЯ			T <sub>4</sub>	Ю <sub>16</sub>															
185		СИНЕМЮР J <sub>1s</sub>	ШАРАПОВСКИЙ	ШАРАПОВСКИЙ	ШАРАПОВСКИЙ								ЗИМНИЙ	УРМАНСКАЯ	УРМАНСКАЯ			T <sub>5</sub>	Ю <sub>17</sub>								
203		ГЕТТАНГСКИЙ J <sub>1h</sub>	ЗИМНИЙ	ЗИМНИЙ	ЗИМНИЙ						Ia																

Рис. 1. Схема стратификации отражающих горизонтов и пластов-коллекторов Западной Сибири

Fig. 1. Scheme of stratification of reflecting horizons and reservoir beds in Western Siberia

свойства создавать значительные скопления углеводородов. Исключение составляет объединенный шараповский+зимний НГК, где в разрезе урманской свиты развиты коллекторы, а перекрывающая ее тогурская свита является покрывкой.

Шараповский+зимний НГК (урманская, тогурская свиты), геттанг – ранний тоар

В пределах урманской свиты выделяются песчаные пласты-коллекторы Ю<sub>17</sub> и Ю<sub>16</sub>, которые являются потенциальными резервуарами нефти и газа. Исследования последних лет показали, что благоприятными зонами для формирования крупных высокодебитных залежей в отложениях нижней юры являются прогибы и впадины, где увеличиваются мощности и экранирующих, и нефтематеринских толщ, и резервуаров, а также улучшаются фильтрационно-емкостные свойства содержащихся в них пластов-коллекторов [5].

Разрезы отложений шараповского+зимнего НГК на территории области вскрыты порядка 118 скважинами, расположенными в пределах крупных отрицательных структур: Ньюрольской, Усть-Тымской, Бакчарской мега- и мезовпадин и Колтогорского мезопргиба. Группа песчаных пластов Ю<sub>17</sub> залегает на доюрских образованиях и без видимого перерыва перекрывается отложениями средней подсвиты урманской свиты. Мощность отложений изменяется от 0 до 98 м (скв. Черталинская-1) при средней толщине 35–40 м. Согласно макро- и микроскопическому описаниям керна, отложения урманской свиты представлены песчано-гравийно-галечными породами, состав обломочной части которых определяется местными источниками сноса. О близости источников свидетельствуют несортированность, неокатанность и неслоистость осадков. Для Колтогорского и Ньюрольского НГР характерно развитие песчаников кварц-грауваккового и грауваккового состава, гравелитов и конгломератов.

Углисто-аргиллитовая пачка средней подсвиты урманской свиты, залегающая непосредственно на доюрских образованиях либо на песчаных образованиях группы пластов Ю<sub>17</sub>, вскрыта в разрезах 41 скважины. Толщина пачки изменяется от 0 до 70 м (скв. Крыловская-2) при средней в 40 м.

По данным кернового материала, полученного в скважинах Колтогорского, Ньюрольского и Казанского НГР, отложения средней пачки имеют в основном сходную литологическую характеристику и представлены аргиллитами от темно-серых до черных, плотными, крепкими, углистыми, с многочисленными включениями обуглившегося растительного детрита. Исключением являются разрезы скважин Пионерская-1 и Черталинская-1, где эти отложения представлены преимущественно песчано-гравелитовой толщей пород.

В Усть-Тымской мезовпадине (Толпаровская, Вертолётная площади) в глинистой пачке отмечаются единичные маломощные прослои песчаников и алевролитов. В восточных районах территории

(Ажарминская, Западная, Ярская площади) отмечается значительное замещение глинистых отложений песчаными разнозернистыми породами.

Отложения верхней подсвиты урманской свиты вскрыты в 53 скважинах. Толщина горизонта колеблется от 0 до 45 м (Куль-Ёганская-2) и в среднем составляет 20–25 м. Для отложений верхней подсвиты урманской свиты характерно литологическое разнообразие: от пелитово-алевролитовых разностей до псефитовых. Отмечаются углистые пропластки, обугленные растительные остатки.

Согласно исследованиям, проведенными ТФ СНИИГГиМСа [7] в Колтогорском прогибе, Ньюрольской, Бакчарской впадинах и западной части Усть-Тымской впадины, горизонт представлен кварц-граувакковыми, полевошпатово-граувакково-кварцевыми и граувакковыми типами песчаных пород. Для песчаников горизонта Ю<sub>16</sub> характерна разнозернистость: от мелкозернистых, часто заглинизированных, до грубозернистых пород, а также различная степень сортировки и окатанности. Состав обломков определяется петрографическим составом близлежащих палеовыступов. Литологическая характеристика пород свидетельствует о том, что отложения горизонта Ю<sub>16</sub> представлены как аллювиально-пролювиальными, так и озёрными фациями.

Отложения тогурской свиты, перекрывающие урманскую, являются главными нефтепроизводящими породами в континентальных отложениях юрского возраста центральных и южных районов Западной Сибири (А.Э. Конторович и др.) [8, 9]. Мощность тогурской свиты меняется от 0 до 46 м (скв. Парбигская-1) при средней 15–20 м. Практически повсеместно отложения свиты представлены аргиллитами серыми, зеленовато-, темно- и буровато-серыми, буровато-чёрными, иногда углистыми, плитчатыми, часто перемятыми, с зеркалами скольжения, иногда битуминозными, с прослоями алевролитов и песчаников. В восточном направлении характеристика отложений свиты меняется, происходит увеличение доли алевролитового и песчаного материалов вплоть до полного опесчанивания (Ажарминская площадь).

Надояхский НГК (пешковская свита), поздний тоар – ранний аален

Надояхский НГК включает отложения пласта Ю<sub>15</sub>, залегающие между тогурской свитой и угольным пластом У<sub>14</sub>, хорошо охарактеризован керна на территории Ньюрольской мезавпадины. В строении горизонта участвуют песчаники различной структуры, алевролиты, конгломераты, отмечаются прослойки аргиллитов и линзы угля.

Грубообломочная часть, составляющая до 60–70 % породы, представлена галькой размером 1–6 см, с преобладанием обломков диаметром 3–4 см. Среди песчаников различаются крупно-, крупно-средне-, средне-мелко- и мелкообломочные разности. Цемент в песчаниках составляет от 3–4 до 15–20 % (плёночно-поровый тип), иногда

его содержание достигает 40–45 % (базально-поровый тип). Цемент чаще сложного глинисто-карбонатного состава.

Отложения надояхского НГК, так же как и образования тогурской, урманской свит, заполняют в основном депрессионные участки палеорельефа и их склоны, но зона их развития гораздо шире.

Вымский НГК (нижне-среднетюменская подсвиты),  
поздний аален – поздний байос

В региональном плане вымский НГК представлен переслаивающимися песчаниками и глинистыми разностями и включает образования групп песчаных пластов Ю<sub>11–14</sub> и Ю<sub>7–10</sub> и залегающую между ними углисто-глинистую пачку, к кровле пластов Ю<sub>11–14</sub> приурочен региональный сейсмический и геологический репер – угольный пласт У<sub>10</sub>. Группа пластов Ю<sub>7–10</sub> по литологическому составу пород представлена неравномерным переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов с многочисленными прослоями углистых аргиллитов и углей – У<sub>6–9</sub>.

Песчаный пласт Ю<sub>14</sub>, датируемый ааленом, представляет собой переслаивание песчаников различной размерности (более крупнообломочных – на бортах крупных положительных структур и более тонкообломочных – в центральных частях депрессионных зон) с аргиллитами и алевролитами, перекрыт углисто-глинистой пачкой, которая представлена тёмно-серыми и чёрными массивными неслойчатыми аргиллитами со значительным количеством углей и углистых аргиллитов. Толщина пачки заметно увеличивается в направлении осевых частей депрессии от 10 до 70 м.

Выше по разрезу выделяется серия песчаных пластов Ю<sub>11–13</sub>, переслаивающихся с алевролитами и аргиллитами. Для этого горизонта характерна литологическая изменчивость и невыдержанность песчаных тел по латерали и практически полное отсутствие крупнозернистых песчаников и грубообломочных пород. Это свидетельствует о том, что, в отличие от более древних песчаных горизонтов, эти отложения формировались в условиях более нивелированного рельефа, когда местные источники сноса перестали играть существенную роль, и в качестве основного поставщика терригенного материала стали выступать структуры обрамления – Алтае-Саянская складчатая область, Енисейский кряж и т. д.

В кровле вымского песчаного горизонта залегают углисто-глинистая пачка, которую венчает регионально выдержанный угольный пласт У<sub>10</sub>. Пачка датируется поздним ааленом – ранним байосом. Глинистый леонтьевский горизонт от кровли угольного пласта У<sub>10</sub> до кровли У<sub>6</sub> датируется байосским возрастом.

К началу байоса на большей части исследуемой территории образования фундамента были перекрыты отложениями осадочного чехла, и привнос терригенного материала осуществлялся главным образом со структур обрамления. В байосе и бате

территория представляла собой почти горизонтальную, незначительно возвышающуюся над уровнем моря, обширную озёрно-аллювиальную, озёрно-болотную и заболоченную равнину. Колебания уровня мирового океана приводили к тому, что морские воды проникали с севера на сотни километров.

Малышевский НГК (верхнетюменская-нижневасюганская подсвиты) поздний байос – ранний оксфорд

Малышевский горизонт вмещает в себя песчаные пласты резервуара Ю<sub>2,6</sub>. Пачка, залегающая между угольными пластами У<sub>6</sub> и У<sub>4</sub>, наиболее опесчанена и содержит мощные горизонты Ю<sub>5</sub> и Ю<sub>6</sub>. Эти горизонты, хотя и не являются хорошо выдержанными по латерали, достаточно уверенно выделяются в разрезах многих скважин. Максимальные толщины песчаников достигают 45 м. Пачка, заключённая между угольными пластами У<sub>4</sub> и У<sub>2</sub>, содержит песчаные горизонты Ю<sub>3</sub> и Ю<sub>4</sub>, которые также характеризуются латеральной и фациальной неоднородностью.

Венчает разрез тюменской свиты песчаный горизонт Ю<sub>2</sub>, который перекрывается морскими отложениями нижневасюганской подсвиты. На ряде площадей отложения песчаного горизонта Ю<sub>2</sub> и угольного пласта У<sub>2</sub> размывы и морские отложения келловая с перерывом залегают на тюменской свите.

Морские ингрессии особенно характерны для позднебатского времени. Тем не менее, на большей части территории Западной Сибири в бате, так же как и в байосе, доминировали аллювиальные, аллювиально-озёрные и озёрно-болотные обстановки осадконакопления. В это время на обширных заболоченных территориях шёл интенсивный процесс углеобразования. Песчаники формировались главным образом в руслах палеорек, палеодельтах и прибрежных частях небольших по размерам палеоозёр [10].

Условия седиментации батских отложений предопределили отсутствие в разрезе комплекса региональных резервуаров и экранов. Песчаные горизонты распространяются локально и характеризуются значительной фациальной и латеральной неоднородностью. Угольные пласты и углито-глинистые пачки также распространены мозаично и могут служить надёжными реперами только в пределах ограниченных территорий [11].

В итоге многолетних поисково-разведочных работ на территории Томской области открыто и поставлено на Государственный баланс 25 месторождений УВ, приуроченных к континентальным отложениям нижней и средней юры. Практически все месторождения многопластовые, кроме Парбигского, Вартовского и Бурановского (табл. 1).

Залежи *зимнего+шараповского НГК* открыты на Северо-Фестивальном, Майском и Северо-Майском месторождениях; *надояхского НГК* – на Герасимовском, Арчинском, Урманском, Западно-Майском, Майском, Южно-Майском, Среднемай-





тенасыщенности интервала по следующей зависимости [14]:

$$p = \sum_{j=1}^m \left( \left( \sum_{i=1}^l R_i^2 \right) / l \right) / m, \quad (2)$$

где  $i$  – индекс, отражающий количество задающих точек скользящей линии;  $j$  – количество шагов. При статистическом анализе данной зависимости было выявлено, что значимым результатом определения коэффициентов корреляции можно принять задающее количество точек  $a_i$  от семи и выше, с шагом  $h=(a_n-7)/l$ .

В этом случае вероятность  $p$  – это аппроксимирующая величина, отражающая такую *долю положительных величин* в корреляционной связи между УЭС и общей пористостью, которая соответствует данной зависимости в доверительном интервале  $\pm 5\%$ . Проще говоря, этот статистический параметр показывает среднее значение аппроксимации для положительной зависимости пористости и УЭС.

Чем больше математическая величина вероятности  $p$ , тем больше доверия к тому факту, что исследуемый интервал насыщен УВ. Назовем этот параметр *вероятностью насыщения УВ*.

Вероятная встречаемость интервалов с вероятной УВ насыщенностью по скважине определялась согласно выражению:

$$P_{\text{вв}} = m/N, \quad (3)$$

где  $m$  – количество интервалов в скважине, в которых определена вероятность насыщения УВ;  $N$  – количество всех исследуемых интервалов в скважине.

В свою очередь известно, что вторичные геохимические процессы в песчаной породе могут образовывать высоко-электропроводящий двойной электрический слой (ДЭС) глинистой фракции, либо вторичная пиритизация в совокупности с ДЭС может сформировать замкнутую электрическую цепь, понижающую УЭС породы и неучтенную стандартными методами интерпретации данных ГИС [15, 16]. В результате перспективные УВ насыщенные пласты могут пропускаться. Для учета вероятности возникновения низкоомного УВ насыщенного интервала в мультипликативную вероятность необходимо ввести вероятностный коэффициент, отражающий долю влияния метасоматитов породы на УЭС пласта.

Для определения доли интервала пласта, где вторичный процесс преобразует вещество, путем скользящей линии точек вдоль оси скважины с неким шагом вычисляем необходимый параметр по следующей зависимости [12, 13]:

$$Y = q/n = \left( \sum_{i=1}^n q_i \right) / n, \quad (4)$$

где  $q$  – количество выборочных значений с отрицательной корреляцией содержания элементов влияния на УЭС (1), т. е. при условии  $R_i < -0,6$ ;  $n$  – генеральная выборка (количество точек песчаного интервала). Статистический параметр  $Y$  выражает

интервальную меру влияния минералов твердой фазы породы, контролирующую понижение УЭС в песчаниках исследуемых пластов, т. е. показывает долю вещества исследуемого интервала, понижающего электрическое сопротивление. Назовем его *интервальный параметр*.

Многочисленные теоретические и эмпирические исследования показали, что средняя интенсивность вторичных процессов по скважине пропорциональна произведению статистических параметров [12, 13, 17]:

$$\langle I \rangle \sim \langle YR^2 \rangle.$$

С увеличением интенсивности преобразования увеличиваются содержания вторичных минералов (пиритов), плотность катионов (калия) в ДЭС (при пелитизации) и межслоевая проводимость [15, 16]. Все это приводит к повышению электрической проводимости, не учитываемой при стандартной интерпретации ГИС. Отрицательная регрессия содержания железа, калия и глинистости с УЭС породы позволяет определять параметры их влияния  $Y$  и  $R^2$  для каждого исследуемого песчаного интервала. Для определения содержания перечисленных элементов влияния разработана технология вычисления их относительной концентрации по материалам стандартного комплекса ГИС [18, 19].

Зная относительные содержания железа, калия и глинистости с последующим вычислением их статистических параметров  $Y$  и  $R$  в отрицательных регрессионных связях с УЭС (при  $R < -0,6$ ) можно определить параметр скрытой электрической проводимости (СЭП):

$$Q = \sum YR_i^2. \quad (5)$$

Очевидно, что каждый из этих параметров пропорционален интенсивности процесса и содержанию вторичного минерала. Например, концентрацию пирита в песчаной породе юрских отложений можно определить по эмпирической зависимости [12]:

$$C_{\text{пир}} = 0,0041Y_{\text{пир}}^2 - 0,1338Y_{\text{пир}} + 0,9194. \quad (6)$$

В данном случае сопоставление результатов петрографических исследований шлифов зерна на предмет содержания пирита с результатами вычисления по формуле (4) (по материалам ГИС, при значениях  $Y_{\text{пир}}$  (*усредненных по интервалу*) выше граничного  $Y_{\text{гр}} = 0,2$ ) показали высокое линейное корреляционное соответствие, с  $R_{\text{пир}} = +0,97$ .

При сопоставлении интенсивностей проявления процессов каолинизации, пелитизации и карбонатизации, определенных по данным ГИС (НГК, ГК, КС, ПС), с результатами петрографических исследований шлифов (по определению содержания вторичных минералов) были выявлены следующие коэффициенты корреляции:  $R_{\text{карб}} = +0,9$ ;  $R_{\text{пел}} = +0,75$ ;  $R_{\text{каоол}} = +0,78$  [4].

Анализируя полученные параметры (2, 3, 5), можно утверждать, что все они связаны с вероятностью образования низкоомных нефтегазонасыщенных интервалов. Поэтому следует ввести мультипликативный параметр  $\Phi$  – вероятности образования УВ насыщенного низкоомного интервала в толще горных пород:

$$\Phi = \langle Q \rangle \langle p \rangle P_{об}. \quad (7)$$

Введенный параметр (7) отражает вероятность встречаемости, вероятность определения и параметр скрытой электрической проводимости низкоомного нефтегазонасыщенного пласта. А его территориальное распределение (усредненное по нижнесреднеюрским пластам) будет выражать перспективность присутствия УВ исследуемых низкоомных зон.

С целью определения эффективности соответствия вычисляемых статистических параметров  $p$  и  $Q$  с характером насыщения песчаных коллекторов нижнесреднеюрских отложений было проведено сопоставление данных параметров с результатами испытания скважин и литологических исследований керна в 120 интервалах, из которых 83 – водонасыщенные (либо сухие) и 37 – УВ-содержащие.

Покажем результаты сопоставления усредненного по структурам статистического параметра  $Qp$  с усредненными эмпирическими данными ( $\langle n \rangle$ ) испытания пласта и литологическими исследованиями образцов керна на предмет среднего количества интервалов с присутствием УВ. Сопоставление выявило две прямо пропорциональные линейные регрессии (группы структур) с коэффициентами  $R_1 = +0,8$  и  $R_2 = +0,88$  (рис. 2). Следует отметить, что каждая точка имеет среднюю статистическую значимость выборки  $Qp$  порядка  $10^3$  значений и  $\sim 10$  эмпирических значений (как с УВ, так и с водой). Поэтому полученные зависимости подтверждают то, что среднестатистический параметр  $Qp$  по латерали достоверно отражает вероятность присутствия в нижнесреднеюрских горизонтах нефтегазонасыщенных пластов. Причем приблизительные минимальные граничные значения параметра  $Qp$  для каждой из групп будут отличаться:  $Qp_{гр1} \approx 0,03$  у.ед. и  $Qp_{гр2} \approx 0,08$  у.ед.

К первой группе структур относятся: Пыль-Караминский мегавал, Нюрольская мегавпадина, Северо-Парабельская мегамоноклиналь, Усть-Тымская мегавпадина и Пудинское мезоподняtie; ко второй группе – Александровский свод, Владимировский мегавыступ, Парабельский мегавыступ, Калгачский мезовыступ, Караминская мезоседловина и межструктурная зона. Очевидно, что параметр  $Qp$  несет в себе еще одну характеристику формирования УВ залежи (кроме количества УВ насыщенных пластов). Выясним причину образования этих групп.

Прежде всего, заметим, что изменение параметра  $Qp$  может быть обусловлено изменением доли поверхностной электропроводимости твердой фазы породы относительно общей проводимости. В свою очередь, изменения поверхностной проводимости и интенсивности преобразования зависят от трансформации пористости, трещинноватости и рН среды. И совершенно ясно, что для двух групп структур перечисленные характеристики должны влиять различным образом.

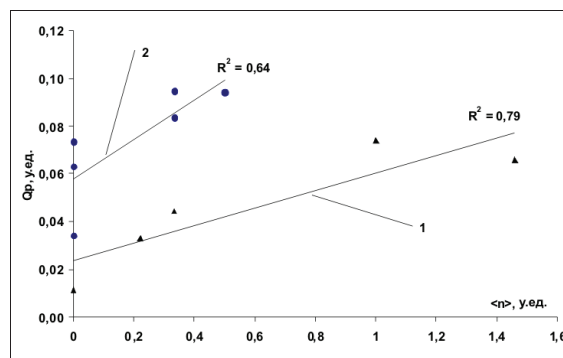


Рис. 2. Сопоставление статистического параметра вероятности образования низкоомного УВ насыщенного интервала (усредненного по структурам) с эмпирическими данными среднего количества интервалов с присутствием УВ, где 1, 2 – номера групп структур

Fig. 2. Comparison of statistical parameter of probability of low-resistivity hydrocarbon saturated interval (structure average) formation with the empirical data of average amount of intervals with hydrocarbons where 1, 2 are the numbers of structure groups

Территориальное (латеральное) распределение усредненных (по структурам) статистических данных выявило соответствие параметра  $Qp$  эмпирическим данным. В свою очередь, при анализе вертикально расположенных нефтегазовых комплексов (по разрезу скважин) было обнаружено, что параметр  $Qp$  не коррелирует с эмпирическими данными. Очевидно, что отсутствие корреляции является следствием влияния таких факторов, не связанных с присутствием УВ, как температура, минерализация и градиент давления в зависимости от глубины на показание УЭС породы и, следовательно, на вычисляемые статистические параметры. Усреднение статистических параметров по глубине позволяет избежать проявления этих искажающих факторов.

Разломы могут быть как источниками образования многоэтажных залежей УВ, так и фактором, разрушающим ранее сформированные залежи и ловушки [20]. Поэтому влияния разломов и соответствующих трещин на процессы, обуславливающие показания статистических параметров, будут различны. Рассмотрим эти влияния.

*Во-первых*, в режиме разрушения имеющейся УВ залежи, с увеличением расстояния до разлома (интенсивность вторичной каолинизации уменьшается), повышается вероятность существования УВ насыщенных интервалов. Причем поступающие из пласта в разлом УВ флюиды латерально замещаются водой, приводящей к образованию ореола водонефтяного контакта и вторичной карбонатизации. Интенсивность вторичной карбонатизации от расстояния до разлома не зависит, но с увеличением карбонатизации пористость будет уменьшаться.

*Во-вторых*, в режиме формирования нефтегазонасыщенных залежей, с увеличением расстояния до разлома (как источника флюидов) вероят-

ность образования УВ насыщенных интервалов уменьшается. В свою очередь, будет уменьшаться интенсивность вторичной пиритизации пористых коллекторов, а пористость будет увеличиваться.

По данным каротажных диаграмм, для 37 песчаных УВ насыщенных пластов, применяя разработанную методику интерпретации, были вычислены интенсивности таких вторичных процессов, как каолинизация, пелитизация, пиритизация и карбонатизация, а также коэффициент общей пористости и средняя концентрация пирита (6).

На основании того, что интенсивность вторичной каолинизации может служить показателем расстояния до разлома (обратная экспоненциальная зависимость [21]), можно построить корреляционные связи между статистическими параметрами и, вычислив их коэффициенты корреляции, проверить вышесказанные замечания. Судя по полученным результатам (табл. 2 и 3), для первой группы структур характерен режим разрушения, а для второй группы – режим формирования залежей. Следовательно, причиной образования именно двух положительных регрессий (рис. 2) в значительной степени являются вышеперечисленные антагонистические режимы. В свою очередь, вне зависимости от режима образования залежи в обоих случаях индикатором присутствия УВ может служить пирит.

**Таблица 2.** Корреляция статистических параметров первой группы структур

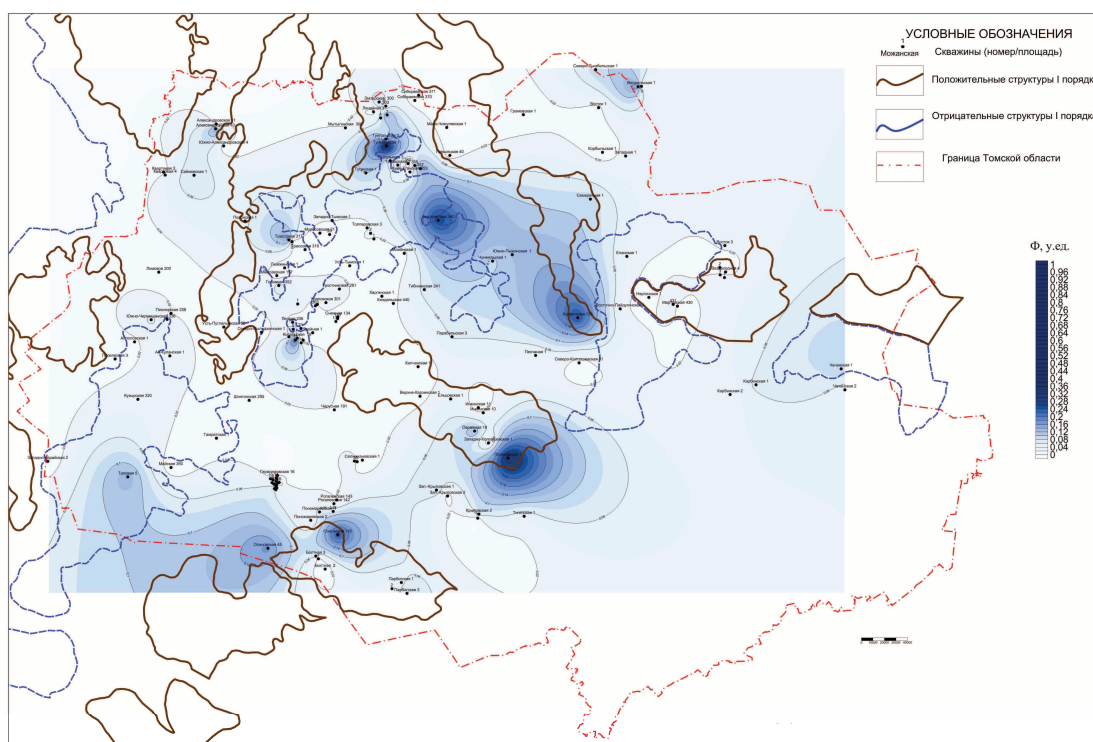
**Table 2.** Correlation of statistical parameters of the first structure group

	<n>	Qp	Y <sub>пир</sub>	I <sub>као</sub>	I <sub>карб</sub>	k <sub>п</sub>	C <sub>пир</sub>
<n>	1						
Qp	0,89	1					
Y <sub>пир</sub>	-0,36	-0,64	1				
I <sub>као</sub>	-0,91	-0,83	0,63	1			
I <sub>карб</sub>	-0,09	-0,44	0,38	4E-17	1		
k <sub>по</sub>	0,27	0,67	-0,64	-0,23	-0,91	1	
C <sub>пир</sub>	0,74	0,63	0,17	-0,42	-0,32	0,28	1

**Таблица 3.** Корреляция статистических параметров второй группы структур

**Table 3.** Correlation of statistical parameters of the second structure group

	<n>	Qp	Y <sub>пир</sub>	I <sub>као</sub>	I <sub>карб</sub>	k <sub>п</sub>	C <sub>пир</sub>
<n>	1						
Qp	0,80	1					
Y <sub>пир</sub>	0,73	0,58	1				
I <sub>као</sub>	0,59	0,43	0,90	1			
I <sub>карб</sub>	-0,22	-0,38	0,40	0,57	1		
k <sub>по</sub>	-0,76	-0,89	-0,35	-0,06	0,67	1	
C <sub>пир</sub>	0,76	0,78	0,71	0,37	-0,20	-0,83	1



**Рис. 3.** Латеральное распределение мультипликативного параметра вероятности образования УВ-насыщенного низкоомного интервала в нижнесреднеюрских отложениях на территории Томской области (структуры 1 порядка отражающего горизонта Ila, по В.А. Конторовичу, 2012)

**Fig. 3.** Lateral distribution of multiplicative parameter of probability of hydrocarbon-saturated low-resistivity interval formation in low-middle Jurassic deposits within the territory of Tomsk region (structures of the first order of the reflecting horizon Ila by V.A. Kontorovich, 2012)

По рассмотренной инновационной методике интерпретации материалов ГИС исследовались нижнесреднеюрские песчаные пласты 150 скважин (порядка 740 песчаных интервалов) Томской области, приуроченные к таким структурам первого порядка как: Пайдугинский мегавал, Парабельский мегавыступ, Северо-Парабельская мегамоноклиналь, Владимировский мегавыступ, Усть-Тымская мегавпадина, Восточно-Пайдугинская мегавал, Средне-Васюганский мегавал, Александровский свод, Пыль-Караминский мегавал, Ньюольская мегавпадина, Средне-Васюганский мегавал и их зон сочленения. Были определены статистические интенсивности пиритизации, пелитизации и интенсивность проявления ДЭС, на основании которых вычислялся параметр СЭП (5). Также по формулам (2) и (3) определялись параметры вероятности для каждого песчаного интервала. После усреднения определенных параметров по всей нижнесреднеюрской толще для каждой скважины проводилось вычисление мультипликативного параметра  $\Phi$  по формуле (7).

Распределение мультипликативного параметра вероятности образования УВ насыщенного низкоомного интервала наиболее ярко выразилось на территориях: северо-востока Томской области, Карамин-

ской мезоседловины, восточной части Усть-Тымской мегавпадины, Пайдугинского мегавала, южной части Парабельского мегавыступа, а также Сомовской, Осиновской и Таловой площадей (рис. 3).

Итак, обобщая проведенные исследования, можно сделать следующие выводы. *Во-первых*, наиболее перспективными НГК в нижнесреднеюрских отложениях Томской области являются надояхский и малышевский комплексы, при условии обнаружения ловушек и флюидоупоров. *Во-вторых*, наиболее перспективные площади (с точки зрения обнаружения низкоомных УВ-насыщенных залежей) находятся на территориях межструктурных зон либо близко расположенных к ним. *В-третьих*, корреляции по латерали между выборками усредненных (по разрезу) данных интенсивностей процессов каолинизации с параметром  $Q_p$ , карбонатизации и пиритизации с пористостью позволяют выявить режимы формирования либо разрушения залежей УВ.

Таким образом, низкоомные залежи в нижнесреднеюрских песчаных пластах территории Томской области обусловлены миграцией флюидов по разломам и трещинам фундамента, образованных в результате тектонических процессов в зонах его растяжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Обстановки осадконакопления и фации / под ред. Х. Редига. – М.: Изд-во «Мир», 1990. – Т. 2. – С. 43–47.
- Хеллем А. Юрский период. – Л.: Недра, 1983. – 272 с.
- Леворсен А. Геология нефти и газа. – М.: Мир, 1970. – 640 с.
- Даненберг Е.Е., Белозёров В.Б., Брылина Н.А. Геологическое строение и нефтегазоносность верхнеюрско-нижнемеловых отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 295 с.
- Геологическое строение и нефтегазоносность нижней-средней юры Западно-Сибирской провинции / Ф.Г. Гурари, В.П. Девятков, В.И. Демин и др. – Новосибирск: Наука, 2005. – 156 с.
- Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2004. – 114 с.
- Тищенко Г.И. Геологическое строение и нефтегазоносность зоны контакта доюрского фундамента и осадочного чехла юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (Томская область): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1978. – 244 с.
- Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. – 253 с.
- Конторович В.А. Мезозойско-кайнозойская тектоника и нефтегазоносность Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 461–474.
- Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. – М.: Недра, 1989. – 294 с.
- Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. – М.: Мир, 1976. – 536 с.
- Мельник И.А. Выявление вторично преобразованных терригенных коллекторов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.
- Мельник И.А. Вычисление интенсивности вторичных геохимических процессов в песчаных пластах по материалам геофизических исследований скважин // Каротажник. – 2014. – № 1. – С. 52–66.
- Мельник И.А. Статистический метод отличия водонасыщенных (низкоомных) коллекторов от нефтегазонасыщенных и выявления перспективных зон // Каротажник. – 2012. – № 4. – С. 29–42.
- Мельник И.А., Ерофеев Л.Я. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 3. – С. 46–50.
- Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // Геофизические исследования. – 2014. – № 4. – С. 44–53.
- Мельник И.А. Определение интенсивности вторичных геохимических процессов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 11. – С. 35–40.
- Мельник И.А. Выделение нефтенасыщенных интервалов на основе переинтерпретации ГИС в низкоомных коллекторах-песчаниках // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 4. – С. 34–36.
- Мельник И.А. Расчет концентраций железа и калия в коллекторах-песчаниках на базе стандартных методов ГИС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2008613040, 25 июня 2008 г.
- Гогель Ж. Основы тектоники / пер. с франц. С.С. Шульца под ред. А.А. Богданова. – М.: Мир, 1969. – 440 с.
- Мельник И.А. Вторичная каолинизация песчаных пластов как признак тектонических нарушений осадочного чехла // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 9. – С. 22–27.

Поступила 16.07.2015 г.

UDC 550.83+550.43+551.86

## GEOLOGICAL STRUCTURE, STRATIGRAPHY AND PERSPECTIVES OF OIL AND GAS POTENTIAL IN THE LOW-MIDDLE JURASSIC DEPOSITS IN TOMSK REGION

**Igor A. Melnik,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: migranis@mail.ru

**Kseniya Yu. Smirnova,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: smirnova86@sibmail.com

**Svetlana V. Zimina,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: pochta@tf-sniigims.ru

**Anastasiya V. Zhdanova,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: JAV2004@rambler.ru

**Olga D. Eliseeva,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: eliseevaod@tf-sniigims.ru

**Evgeniya V. Shelamova,**

Tomsk Branch of the «Siberian Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», 232, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: Shelamova-e-w@yandex.ru

*The relevance of the discussed paper is related to a national objective of increasing a gain of stocks of hydrocarbonic raw materials and bad geological study of the Lower-Middle Jurassic deposits of the Southeast of Western Siberia.*

**The main aim** of the consists in complex studying of geological structure of the Lower-Middle Jurassic layers on the territory of Tomsk region as well as in defining the perspectives of oil-and-gas zones caused by the secondary processes.

*The authors have used the traditional methods of lithological and stratigraphy correlation of cuts of wells on the materials of well logging, descriptions of results of petrographic analysis of shlif on the base of «Affairs of wells», and the innovative statistical interpretation method of the GIS date regarding the identification of low-impedance hydrocarbonic saturated collectors and intensity of the secondary geochemical processes.*

*The paper introduces the results of generalization of a geological structure and stratigraphy of the Lower-Middle Jurassic deposits of the Tomsk region. Oil and gas complexes were allocated and on the base of empirical data the prospects in formation of hydrocarbon deposits of each complex were shown. The intensity of the secondary processes and probability formation of low-resistance collector were based on the innovative statistical interpretation method of the GIS date. The authors determined the areas of higher perspective in Low-Middle Jurassic deposits.*

**The results.** *Nadoyakhsky and malyshevsky complexes are the most perspective oil and gas companies in the Low-Middle Jurassic deposits of the Tomsk region, in case of detection of impermeable layers and traps. The most perspective areas (from the point of view of detection of the low-impedance hydrocarbonic saturated deposits) are within the territories of interstructural zones, or the ones close located to them. Lateral correlations between the samplings of the average data (on a section) of kaolinization intensities with a low-impedance parameter, carbonization and pyritization with porosity allow revealing the formation modes, or destructions of hydrocarbonic deposits.*

**Key words:**

*Stratigraphy, transgressive and regressive horizons of Low-Middle Jurassic deposits, well logging, low-resistance collector, hydrocarbons, secondary geochemical process.*

## REFERENCES

1. *Obstanovka osadkonakopleniya i fatsii* [Sedimentary environment and facies]. Ed. by Kh. Reding. Moscow, Mir Publ., 1990. Vol. 2, pp. 43–47.
2. Khellem A. *Yurshiy period* [Jurassic Period]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 1983. 272 p.
3. Levorsen A. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and gas geology]. Moscow, Mir Publ., 1970. 640 p.
4. Danenberg E.E., Belozherov V.B., Brylina N.A. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost verkhneyurskikh – nizhnemelovykh otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)* [Geological structure and petroleum potential of the middle-Cretaceous – lower-Jurassic deposits of the Southeast of Western Siberia (Tomsk region)]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 295 p.
5. Gurari F.G., Devyatov V.P., Demin V.I. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost nizhney-sredney yury Zapadno-Sibirskoy provintsii* [Geological structure and petroleum potential of the Lower-Middle Jurassic of Western Siberian province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 156 p.
6. *Reshenie 6-go Mezhvedomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya po rassmotreniyu i prinyatiyu utochnennykh stratigraficheskikh skhem mezozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri* [The resolution of the 6<sup>th</sup> Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the consideration and adoption of revised stratigraphic schemes of Mesozoic deposits of Western Siberia]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 2004. 114 p.
7. Tishchenko G.I. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost zony kontakta doyruskogo fundamenta i osadochnogo chekhla yugovostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)*. Dis. Kand. nauk [Geological structure and petroleum potential of the contact zones of pre-Jurassic base and sedimentary cover of the Southeast of Western Siberia (Tomsk region). Cand. Diss.]. Novosibirsk, 1978. 224 p.
8. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and petroleum history of Mesozoic and Cainozoic deposits of southeastern regions of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ., branch «GEO», 2002. 253 p.
9. Kontorovich V.A. *Mezozoysko-kaynozoykskaya tektonika i neftegazonosnost Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and petroleum history of Mesozoic and Cainozoic deposits of southeastern regions of Western Siberia]. *Geology and geophysics*, 2009, vol. 50, no. 4, pp. 461–474.
10. Selli R. *Drevnie obstanovki osadkonakopleniya* [Ancient sedimentation environment]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 294 p.
11. Pettigone F.J., Potter P., Siver R. *Peski i peschaniki* [Sand and sandstones]. Moscow, Mir Publ., 1976. 536 p.
12. Melnik I.A. *Vyavlenie vtorichno preobrazovannykh terrigennykh kollektorov na osnove statisticheskoy interpretatsii materialov GIS* [Identification of secondary transformed terrigenous collectors on the base of statistical interpretation of materials GIS]. *Geofizika*, 2013, no. 4, pp. 29–36.
13. Melnik I.A. *Vychislenie intensivnosti vtorichnykh geokhimicheskikh protsessov v peschanykh plastakh po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Calculation of intensity of secondary geochemical processes in sandy layers on the materials of geophysical surveys of wells]. *Karotazhnik*, 2014, no. 1, pp. 52–66.
14. Melnik I.A. *Statisticheskii metod otlichiya vodonasyshchennykh (nizkoomnykh) kollektorov ot neftegazonasyshchennykh i vyavleniya perspektivnykh zon* [Statistical method of difference of water-saturated (low-impedance) collectors from oil and gas saturated and identification of perspective zones]. *Karotazhnik*, 2012, no. 4, pp. 29–42.
15. Melnik I.A., Erofeev L.Ya. *Fiziko-geokhimicheskaya model nizkoomnogo kolektora i ee prakticheskoe priminenie* [Physics and geochemical model of the low-impedance collector and its practical application]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 3, pp. 46–50.
16. Melnik I.A. *Prichiny ponizheniya elektricheskogo soprotivleniya v nizkoomnykh kollektorakh* [The reasons of decreasing electric resistance in the low-impedance collectors]. *Geophysical Research*, 2014, no. 4, pp. 44–53.
17. Melnik I.A. *Opreделение vtorichnykh geokhimicheskikh protsessov na osnove statisticheskoy interpretatsii materialov GIS* [Determination of intensity of secondary geochemical processes on the basis of statistical interpretation of materials GIS]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2012, no. 11, pp. 35–40.
18. Melnik I.A. *Vydelenie neftenasychshennykh intervalov na osnove pereinterpretatsii GIS v nizkoomnykh kollektorakh-peschanikakh* [Revealing petroleum-bearing intervals based on reinterpretation of well logging data]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2008 no. 4, pp. 34–36.
19. Melnik I.A. *Raschet kontsentratsiy zheleza i kaliya v kollektorakh-peschanikakh na baze standartnykh metodov GIS* [Calculation of iron and potassium concentration in sandstones collectors on the base of the GIS standard methods]. Certificate on the state registration of the computer program, no. 2008613040, 2008.
20. Gogel Dj. *Osnovy tektoniki* [Base of tectonics]. Moscow, Mir Publ., 1969. 440 p.
21. Melnik I.A. *Vtorichnaya kaolinizatsiya peschanykh plastov kak priznak tektonicheskikh narusheniy osadochnogo chekhla* [Secondary kaolonization of sand formation as the sign of sedimentary cover tectonic deformations]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 9, pp. 22–27.

Received: 16 July 2015.

УДК 004.492.2

## ЛИНЕЙНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ЛИНЕЙНУЮ ЧАСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

**Кукало Иван Анатольевич,**

аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: i@kukalo.ru

**Гривцов Сергей Николаевич,**

ведущ. специалист отдела координации охранной деятельности Службы безопасности АО «Транснефть – Центральная Сибирь», Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, д. 24. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

*Необходимость динамического управления большим количеством трудовых и производственных ресурсов при проведении строительных, ремонтных и профилактических мероприятий на магистральных нефтепроводах делает актуальной задачу «привязки» географических координат подвижных объектов к линейной части магистрального нефтепровода.*

**Цель работы:** создание методики линейного отображения географических координат подвижного объекта к линейной части магистрального нефтепровода на основе данных о дискретном наборе его отдельных географических координат.

**Методы исследования:** векторная алгебра, геометрия земного сфероида, погрешности арифметических операций, эвристические методы прямого поиска, методы сжатия информации, линейная интерполяция функций.

**Результаты.** Сформулирована задача линейного отображения координат подвижного объекта к линейной части магистрального нефтепровода. Приведено описание методики решения поставленной задачи на основе данных о дискретном наборе географических координат километровых участков линейной части магистрального нефтепровода. Представлены результаты использования методики для преобразования данных аэровизуального наблюдения участка линейной части магистрального нефтепровода «Александровское – Анжеро-Судженск», рассмотрены интерполяционные свойства методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков линейной части магистрального нефтепровода. Произведена оценка погрешности алгоритмов методики с учетом указанного допущения, которое не учитывает эллипсоидную форму земли при расчете расстояний между двумя точками на земной поверхности. Дана оценка погрешности для данных аэровизуального наблюдения участка линейной части магистрального нефтепровода «Александровское – Анжеро-Судженск». Для заданной конфигурации охранных зон магистральных трубопроводов предложен способ обработки информации о множестве географических координат подвижного объекта с учетом предельной величины удаленности объекта от оси трубопровода. Показано, что совместное использование разработанной методики линейного отображения и способа обработки данных дает возможность сжатия данных о траектории перемещения подвижного объекта после их преобразования во множество обследованных участков линейной части магистрального нефтепровода.

### **Ключевые слова:**

Магистральный нефтепровод, линейное отображение, географические координаты, аэровизуальное наблюдение, сжатие данных с потерями.

Современная транспортировка нефти может осуществляться различными видами транспорта – трубопроводным, железнодорожным, водным, автомобильным, воздушным, однако транспортировку более 92 % добываемой в России нефти обеспечивает государственная трубопроводная компания ОАО «АК «Транснефть» [1]. Она располагает крупнейшей в мире системой магистральных нефтепроводов, длина которой составляет свыше 70 тыс. км [1].

Необходимость динамического управления большим количеством трудовых и производственных ресурсов при проведении строительных, ремонтных и профилактических мероприятий на линейной части магистрального нефтепровода (ЛЧ МН) делает актуальной задачу «привязки» географических координат подвижного объекта к «собственным координатам», ассоциированными с ЛЧ МН, которая характеризуется весьма протяженной структурой. Задача такого рода линейного отображения рассматривалась в наиболее распространенных геоинформационных системах [2] и системах управления базами данных [3], однако описание реализованных алгоритмов разработчиками

систем не приводится, поскольку указанные программные продукты являются проприетарными. В то же время реализация методики линейного отображения является ключевым требованием международных стандартов хранения данных в области трубопроводного транспорта [4], универсальных геоинформационных систем управления трубопроводами [5], национальных систем картографирования трубопроводов [6].

Основная цель данной статьи – описание разработанной методики линейного отображения географических координат подвижного объекта на структуру ЛЧ МН (далее методики линейного отображения) с учетом данных о дискретном наборе ее отдельных географических координат [7].

### **Постановка задачи**

Оперативное позиционирование на местности осуществляется, как правило, с использованием устройств глобальной системы позиционирования, т. е. GPS/ГЛОНАСС навигаторов. Современные навигаторы предоставляют информацию о широте, долготе и геодезической высоте объекта со средним

значением погрешности около 5 м [8], в географических системах координат ПЗ-90.11 [9], WGS84 [10], где за основу модели земного шара взят эллипсоид с параметрами, представленными в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры географических систем координат  
**Table 1.** Parameters of geographical coordinate systems

Наименование системы координат Coordinate system	Большая полуось (экваториальная), м Major semi axis (equatorial), m	Малая полуось (полярная), м Minor semi axis (polar), m	Сжатие эллипсоида Ellipsoid compression
Параметры Земли 1990 г. (ПЗ-90.11) Parameters of the Earth	6378136	6356751,3618	1/298,25784
World Geodetic System 1984 г. (WGS 84)	6378137	6356752,3142	1/298,25722

Учитывая вышеизложенные входные параметры, представим подвижный объект в виде дискретного множества  $O = \{O^t\}$ ,  $O^t = (O_{lat}^t, O_{lng}^t, O_h^t)$ , где  $\{O^t\}$  – множество точек траектории объекта;  $t$  – время фиксации координат объекта;  $O_{lat}^t$  – широта объекта;  $O_{lng}^t$  – долгота объекта;  $O_h^t$  – геодезическая высота объекта. В то же время модель ЛЧ МН  $S$  представим в виде ломаной линии:

$$S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}, \quad s_i = (s_{lat}^i, s_{lng}^i, s_h^i, s_{km}^i),$$

где  $s_i$  – точка ЛЧ МН;  $s_{lat}$  – широта точки;  $s_{lng}$  – долгота точки;  $s_h$  – геодезическая высота точки;  $s_{km}$  – удаленность участка ЛЧ МН от его начала.

Учитывая технические характеристики ЛЧ МН, установим следующие ограничения для ломаной линии  $S$  – она может быть вырожденной, не может содержать пересечений и соответствует кратчайшему маршруту между первой и последней точками ломаной с учетом незначительных отклонений.

С учетом введенных обозначений, искомая методика отображения сводится к операции:

$$O^t \rightarrow (s_o^t, h_o^t), O^t s_o^t = \min_{s_j \in S} (O^t s_j), \quad (1)$$

где  $s_o^t = (s_{o_{lat}}^t, s_{o_{lng}}^t, s_{o_h}^t, s_{o_{km}}^t)$ , то есть преобразование координаты объекта из географической системы координат в линейную систему координат ЛЧ МН;  $h_o^t$  – выходной параметр методики, определяющий удаленность объекта от участка ЛЧ МН  $s_o^t$ , к которому была осуществлена привязка.

Алгоритм решения соотношения (1) представим структурной схемой (рис. 1).



**Рис. 1.** Структурная схема методики линейного отображения

**Fig. 1.** Block diagram of the linear mapping technique

### Описание методики линейного отображения

Расчет значения  $s_o^t$  будем осуществлять в два этапа модернизированным методом линейного поиска с оптимизированным алгоритмом поиска интервала неопределенности, основанным на имеющихся исходных данных:

- 1) определение первичного интервала неопределенности – поиск вершины ломаной линии  $s_i^{\min}$ , расстояние от которой до объекта  $O^t$  минимально, то есть

$$O^t s_i^{\min} = \min_{s_i \in S} (O^t s_i);$$

- 2) уточнение минимального значения функции – поиск на прилегающих звеньях ломаной линии точки  $x_o$ , расстояние от которой до объекта  $O^t$  минимально, то есть

$$O^t s_o^t = \min_s (O^t s_i), s \in ([s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \cup [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]).$$

Для решения первой части задачи введем понятие функции удаленности координаты объекта  $O^t$  от вершины ломаной линии –  $f(s_i) = O^t s_i$ . Известно, что расчет расстояний между двумя точками на поверхности эллипсоида можно производить как в геодезической системе координат, так и в прямоугольной пространственной. Расчеты в прямоугольной системе координат являются менее требовательными к вычислительным ресурсам, поскольку они проводятся по формулам векторной алгебры [11], в то время как в геодезической системе координат требуется использование более сложных формул сферической геометрии [12]. С учетом вышеизложенного, воспользуемся прямоугольной системой координат.

Для перехода из геодезической системы координат в прямоугольную воспользуемся стандартными формулами [13]:

$$x_o = (N(O_{lat}^t) + O_h^t) \cos O_{lat}^t \cos O_{lng}^t;$$

$$y_o = (N(O_{lat}^t) + O_h^t) \cos O_{lat}^t \sin O_{lng}^t;$$

$$z_o = (N(O_{lat}^t)(1 - e^2) + O_h^t) \sin O_{lat}^t,$$

где  $x_o, y_o, z_o$  – прямоугольные пространственные координаты объекта;  $N(O_{lat}^t)$  – радиус кривизны первого вертикала;  $e^2 = 2\alpha - \alpha^2$  – эксцентриситет эллипсоида;  $\alpha$  – сжатие эллипсоида;  $a$  – большая полуось эллипсоида.

Радиус кривизны первого вертикала рассчитывается по формуле:

$$N(O_{lat}^t) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 O_{lat}^t}},$$

где  $x_o, y_o, z_o$  – прямоугольные пространственные координаты объекта;  $x_s, y_s, z_s$  – прямоугольные пространственные координаты точки на ЛЧ МН.

Тогда значение  $f(s_i)$  в декартовых координатах будет:

$$f(s_i) = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2 + (z_o - z_s)^2}. \quad (2)$$

Рассчитаем далее значение функции  $f(s_i)$  для всех  $s_i \in S$ . Учитывая введенные ограничения на



характеристику ломаной линии  $S$ , установим в качестве допущения, что функция  $f(s_i)$  является непрерывной и унимодальной. Тогда задача поиска  $s_i^{\min}$  сводится к решению задачи одномерной оптимизации функции  $f(s_i)$ .

Поскольку значение функции не представлено аналитически для поиска  $s_i^{\min}$ , воспользуемся эвристическими методами прямого поиска для уменьшения интервала неопределенности, например, методом золотого сечения. Учитывая, что значение функции  $f(s_i)$  определено через различные дискретные интервалы, воспользуемся приемом вложения дискретной функции в непрерывную [14].

**Вход:**  $S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}$ ,  $s_i = (s_{lat}^i, s_{lng}^i, s_h^i)$ , начальные границы  $s_{first} = s_1$ ,  $s_{last} = s_n$ ,  $\varepsilon$  – количество требуемых дискретных значений  $s_i$  в интервале сужения.

**Выход:** интервал неопределенности  $(s_{inter}^{\prime}, s_{inter}^{\prime\prime})$ .

**Шаг 1.** Рассчитаем точки деления:

$$s' = s_{last} - \frac{s_{last} - s_{first}}{\varphi}, \quad s'' = s_{first} + \frac{s_{last} - s_{first}}{\varphi},$$

где  $\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$  – пропорция золотого сечения.

**Шаг 2.** Если  $q(s', s'') > \varepsilon$ , переходим к шагу 3, иначе **Выход**,  $s_{inter}^{\prime} = s'$ ,  $s_{inter}^{\prime\prime} = s''$ , где  $q$  – количество дискретных значений  $s_i$  на интервале  $(s', s'')$ ,  $s'_i = [s', s_i] = \lfloor s' \rfloor$ ,  $s''_i = \lfloor s'' \rfloor$ ,  $\lfloor s \rfloor$  – наибольшее целое, не превосходящее число  $s$ ,  $\lceil s \rceil$  – наименьшее целое, которое не меньше числа  $s$ .

**Шаг 3.** Рассчитаем значения функции  $f(s'_i)$ ,  $f(s''_i)$ .

**Шаг 4.** Если  $f(s'_i) \geq f(s''_i)$ , то  $s_{first} = s'_i$ , иначе  $s_{last} = s''_i$ , переход к шагу 1.

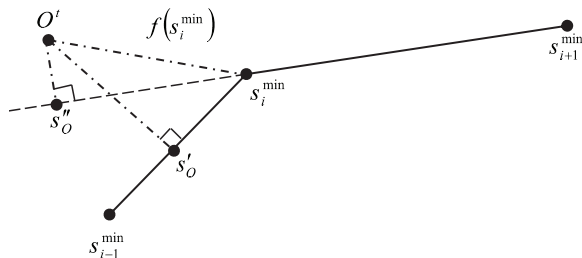
Итоговое значение минимума функции после уменьшения интервала неопределенности определим методом линейного поиска  $s_i^{\min} = \min(s_{inter}^{\prime}, \dots, s_{inter}^{\prime\prime})$ .

Далее поиск интервала неопределенности будем осуществлять по упрощенной формуле:

$$s_{inter}^{\prime} = s_i^{\min} - V_{\max} t k_1;$$

$$s_{inter}^{\prime\prime} = s_i^{\min} + V_{\max} t k_1,$$

где  $k_1 \geq 1$  – поправочный коэффициент для учета погрешности средств определения географических координат;  $V_{\min}$  – максимальная скорость подвижного объекта;  $t$  – время, прошедшее с момента последнего определения интервала неопределенности.



**Рис. 2.** Варианты расположения перпендикуляров к прилегающим звеньям ломаной

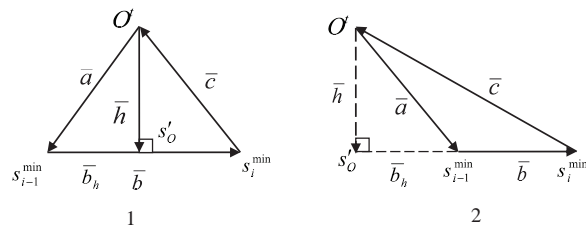
**Fig. 2.** Positions of perpendicular lines to the adjacent segments of a broken line

Решение второй части поставленной задачи предполагает построение отрезков минимальной длины, то есть перпендикуляров  $O's'_o$ ,  $O's''_o$  к отрезкам  $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$  и  $[s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$ . Очевидно, что перпендикуляры могут располагаться как на звене ломаной линии – отрезок  $O's'_o$  на рис. 2, так и за ее пределами – отрезок  $O's''_o$ .

Определим множество возможных вариантов расположения перпендикуляров и соответствующие им значения  $O's'_o$ :

- 1) если  $s'_o \notin [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s''_o \notin [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$ ,  
то  $O's'_o = O's_i^{\min}$ ;
- 2) если  $s'_o \in [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s''_o \in [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$ ,  
то  $O's'_o = \min(O's'_o; O's''_o)$ ;
- 3) если  $s'_o \in [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s''_o \notin [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$ ,  
то  $O's'_o = O's'_o$ ;
- 4) если  $s'_o \notin [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s''_o \in [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$ ,  
то  $O's'_o = O's''_o$ .

Рассмотрим алгоритм расчета  $O's'_o$  для отрезка  $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$ . Алгоритм расчета  $O's''_o$  будет осуществляться аналогичным образом. Расчет величины перпендикуляра  $O's'_o$  произведем по формулам векторной алгебры, положения которой часто используются для решения задач геодезии [11]. Для удобства записи заменим  $O's_{i-1}^{\min}$  на вектор  $\vec{a}$ ,  $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$  на  $\vec{b}$ ,  $O's_i^{\min}$  на  $\vec{c}$ ,  $O's'_o$  на  $\vec{h}$ . Очевидно, что вектор  $\vec{h}$  может как пересекать, так и не пересекать вектор  $\vec{b}$  в трехмерном пространстве. Варианты расположения вектора  $\vec{h}$  отображены на рис. 3.



**Рис. 3.** Варианты расположения векторов

**Fig. 3.** Positions of vectors

Очевидно, что при  $\vec{a} \cdot \vec{b} \leq 0$  угол между векторами либо острый, либо прямой, и вектор  $\vec{h}$  пересекает  $\vec{b}$  в точке  $s'_o$ , что соответствует случаю 1 на рис. 3, в то время как при  $\vec{a} \cdot \vec{b} > 0$  точка  $s'_o$  лежит за пределами  $\vec{b}$  и соответствует случаю 2 на рис. 3.

Определим векторы  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  по двум точкам в трехмерном пространстве, тогда значение величины  $h$  можно рассчитать по формуле расстояния между линией и точкой в трехмерном пространстве [15]:

$$h = \|\vec{h}\| = \frac{\|\vec{a} \times \vec{b}\|}{\|\vec{b}\|},$$

где  $\vec{a} \times \vec{b}$  – операция векторного произведения;  $\|\vec{x}\|$  – длина вектора  $\vec{x}$ ;

$$\bar{a} = ((x_{o_t} - x_{s_{i-1}^{\min}}), (y_{o_t} - y_{s_{i-1}^{\min}}), (z_{o_t} - z_{s_{i-1}^{\min}}));$$

$$\bar{b} = ((x_{s_i^{\min}} - x_{s_{i-1}^{\min}}), (y_{s_i^{\min}} - y_{s_{i-1}^{\min}}), (z_{s_i^{\min}} - z_{s_{i-1}^{\min}})).$$

Значение  $b_n$  определим по формуле вычисления проекции вектора на плоскость в трехмерном пространстве [16]:

$$b_h = \|\bar{b}_h\| = \left\| \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b} \right\|,$$

где  $\bar{a} \cdot \bar{b}$  – операция скалярного произведения векторов.

Итоговое значение  $s'_{okm}$  рассчитаем по формуле:

$$s'_{okm} = s_{i-1 km}^{\min} + \frac{b_h}{b} (s_{ikm}^{\min} - s_{i-1 km}^{\min}). \quad (3)$$

Определим значение географической координаты точки  $s'_{oxyz}$  в прямоугольных пространственных координатах:

$$s'_{oxyz} = \left( x_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_x, y_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_y, z_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_z \right),$$

где  $s'_{oxyz}$  – прямоугольные пространственные координаты точки  $s'_0$ .

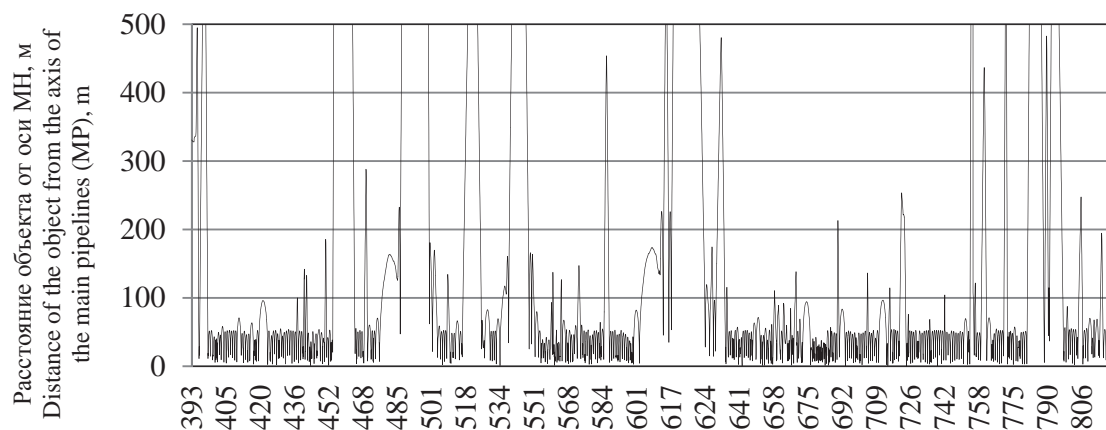
Для перехода из прямоугольной системы координат в геодезическую воспользуемся стандартным методом [13]:

$$s'_{oellipse} = G_{5.1.2}(s'_{oxyz}), \quad (4)$$

где  $s'_{oellipse} = (s'_{o lat}, s'_{o lng}, s'_{o h})$  – геодезические координаты точки  $s'_0$ ;  $G_{5.1.2}$  – итеративный метод преобразования координат из прямоугольной системы координат в геодезическую [13].

Погрешностью метода  $G_{5.1.2}$  можно пренебречь, поскольку она составляет не более 0,003 м [13], что значительно ниже погрешности GPS/ГЛОНАСС навигаторов.

Объединяя результаты формул (3) и (4), получим итоговое значение  $s'_0 = (s'^t_{o lat}, s'^t_{o lng}, s'^t_{o h}, s'^t_{o km})$ .



МН «Александровское – Анжеро-Судженск», км  
MP «Aleksandrovskoe – Anzhero-Sudzhensk», km

Рис. 4. Результаты расчета  $h_o^t$

Fig. 4. Results of  $h_o^t$  calculation

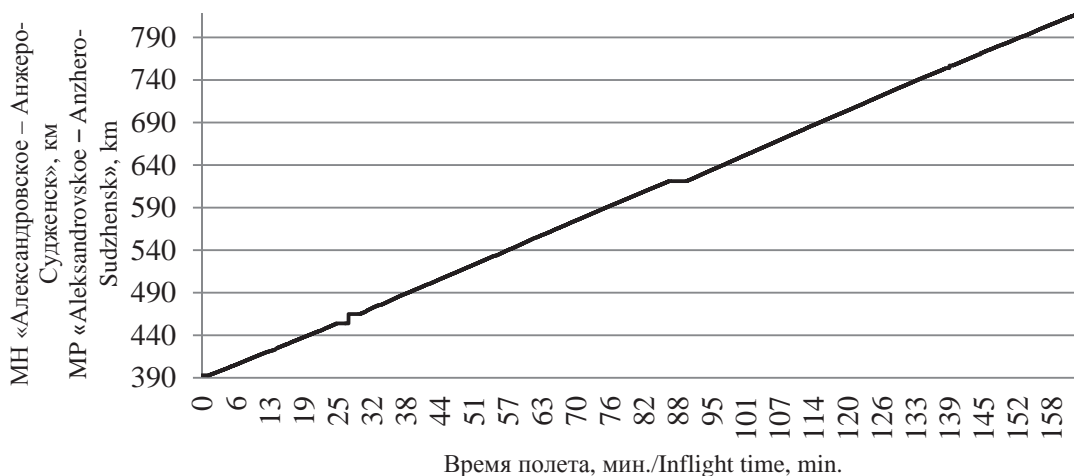


Рис. 5. Результаты расчета  $s'_{okm}$

Fig. 5. Results of  $s'_{okm}$  calculation

### Апробация методики линейного отображения

Рассмотрим пример практического применения изложенной методики для поиска значения  $h_o^t = O^t s_o^t = \min(Os_o^t; Os_o^t; Os_o^t)$  и отображения  $O^t \rightarrow s_o^t \in (s_o^{\min}, s_o^t, s_o^{\max})$  для данных аэровизуального наблюдения МН «Александровское – Анжеро-Судженск», проводимого эксплуатационными подразделениями АО «Транснефть – Центральная Сибирь». На рис. 4, 5 представлены графики соответствующих значений  $h_o^t$  и  $s_o^t$ .

Для оценки интерполяционных характеристик методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков ЛЧ МН (например, в труднодоступной, болотистой местности) на рис. 6 приведен график значений  $s_{o,km}^t$  и  $s_{i,km}^{\min}$  для данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» 580–650 км.

Красной линией на графике представлено значение функции  $s_{i,km}^{\min}(t)$ , которое определяет значение ближайшего к подвижному объекту дискретного километрового участка ЛЧ МН. Синей линией на графике представлено значение функции  $s_{o,km}^t(t)$ , которое определяет значение километрового участка ЛЧ МН после привязки подвижного объекта с помощью разработанной методики.

### Погрешность методики отображения

Дадим оценку погрешности алгоритма [17] преобразования  $O^t \rightarrow s_o^t, O^t s_o^t = \min_{s_j \in S} (O^t s_j)$ , связанную с переходом к прямоугольным пространственным координатам, которые не учитывают эллипсоидную форму Земли.

Прежде всего определим погрешность, возникающую при вычислении единичного расстояния

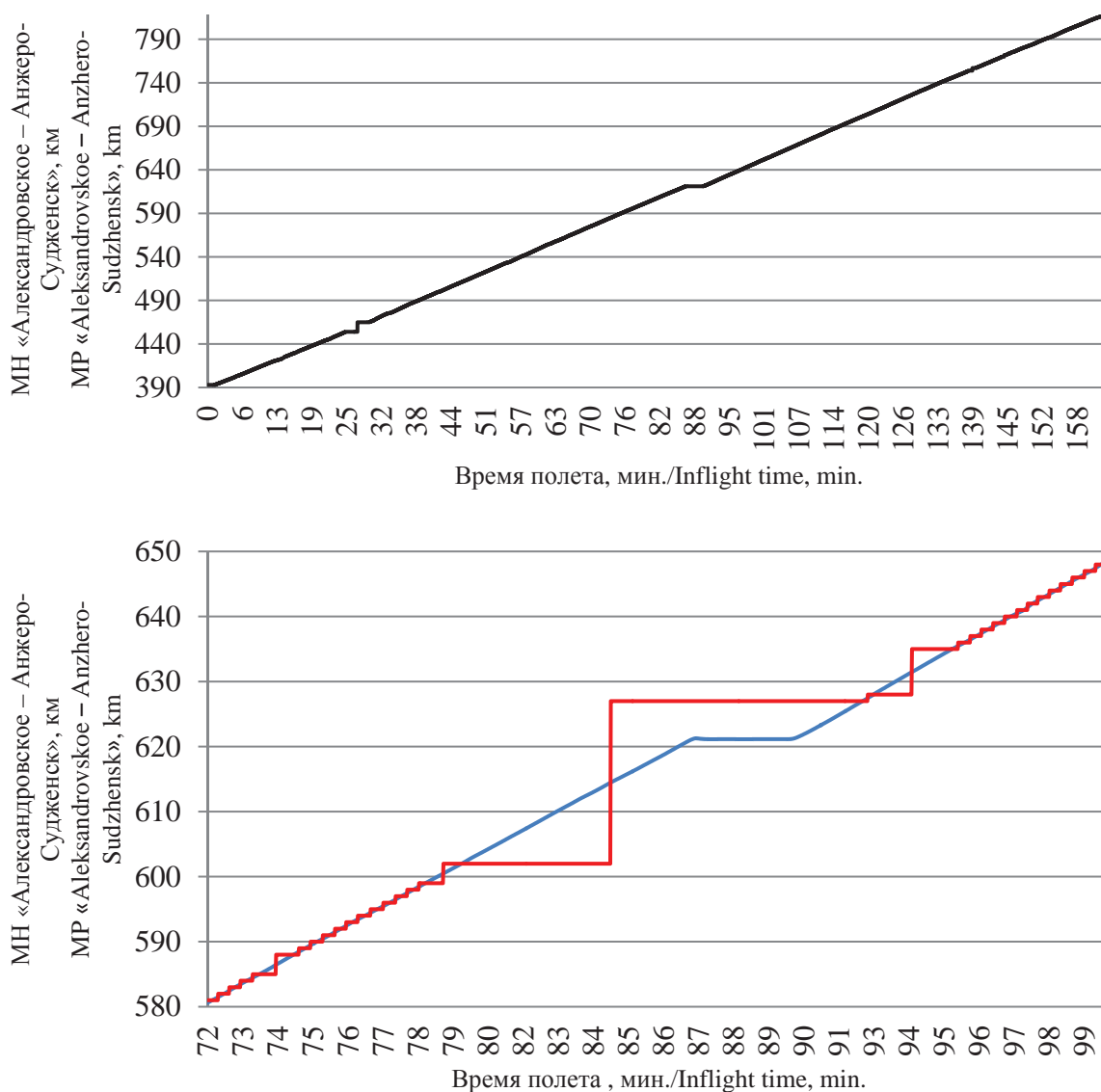


Рис. 6. Интерполяция координаты подвижного объекта к ЛЧ МН

Fig. 6. Interpolation of the mobile object coordinate to the LP MP

в прямоугольных пространственных координатах  $d_{xyz}$  по известной широте, долготе и высоте объекта. Для определения истинного значения расстояния  $d_{ellipse}$ , относительно которого будет рассчитываться погрешность, воспользуемся формулой Т. Висенти [12]:

$$d_{ellipse}(p_1, p_2) = V_{inverse}^{4-1}(p_1, p_2),$$

$$p_1 = (p_{lat}^1, p_{lng}^1), p_2 = (p_{lat}^2, p_{lng}^2),$$

где  $p_1, p_2$  – координаты точек, между которыми определяется расстояние;  $V_{inverse}^{4-1}$  – формула определения

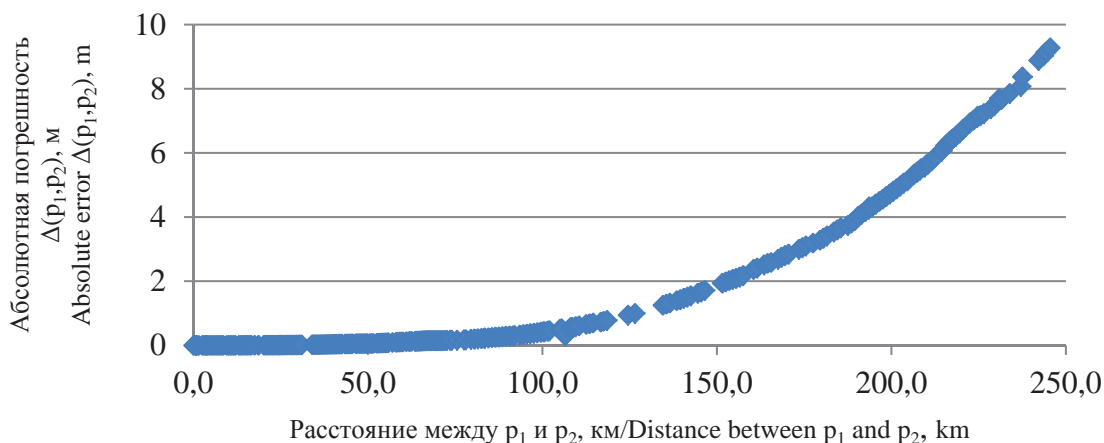


Рис. 7. Зависимость  $\delta(p_1, p_2)$  от  $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

Fig. 7. Dependence of  $\delta(p_1, p_2)$  on  $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

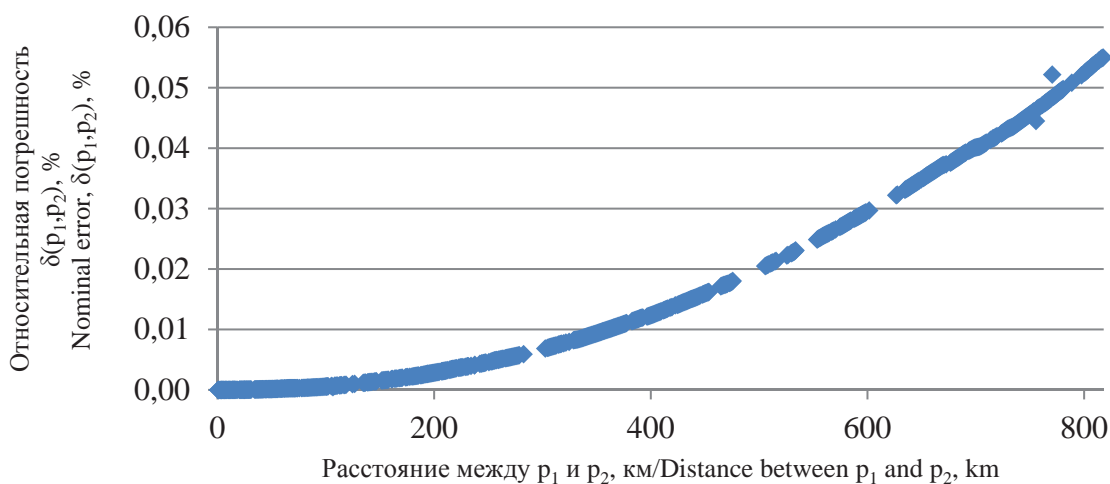
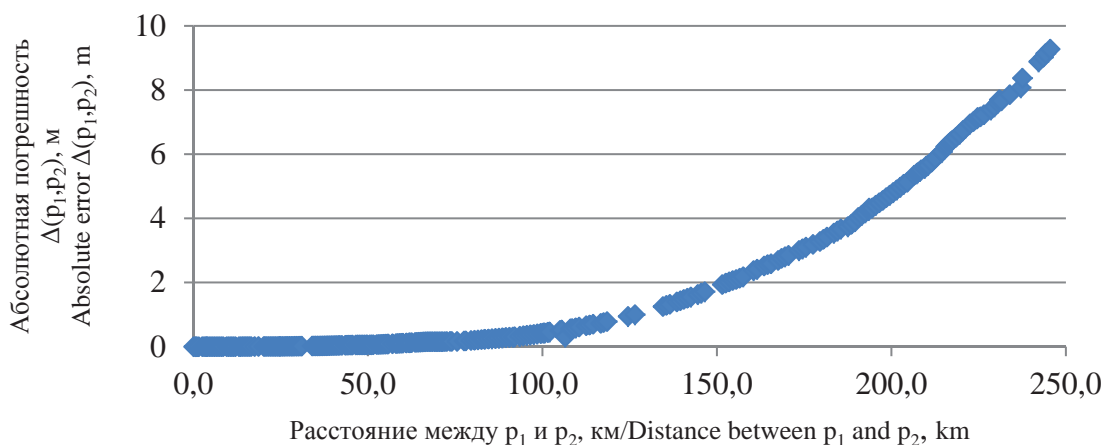


Рис. 8. Зависимость  $\delta(p_1, p_2)$  от  $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

Fig. 8. Dependence of  $\delta(p_1, p_2)$  on  $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

расстояния между двумя точками на эллипсоиде с заданными географическими координатами [12].

Погрешностью формулы  $V_{inverse}^{4-1}$  можно пренебречь, поскольку она составляет 0,5 мм [12], что значительно ниже погрешности GPS/ГЛОНАСС навигаторов, которые определяют входные параметры методики.

Очевидно, что расстояние между двумя точками в прямоугольных пространственных координатах  $d_{xyz}$  будет приближенным значением по недостатку к истинному значению  $d_{ellipse}$ , то есть  $d_{xyz} < d_{ellipse}$ , поскольку прямая линия определяет кратчайшее расстояние между двумя точками в прямоугольных координатах и тем самым «срезает» поверхность земного эллипсоида.

Тогда значение абсолютной погрешности  $\Delta(p_1, p_2)$  рассчитаем по формуле [18]:

$$\Delta(p_1, p_2) = (d_{ellipse}(p_1, p_2) - d_{xyz}(p_1, p_2)), \Delta(p_1, p_2) \geq 0, \quad (5)$$

где  $d_{xyz}(p_1, p_2)$  – расстояние в прямоугольных пространственных координатах, рассчитывается по формуле (2).

Соответственно, относительную погрешность  $\delta(p_1, p_2)$  рассчитаем по формуле [18]:

$$\delta(p_1, p_2) = \frac{\Delta(p_1, p_2)}{d_{ellipse}(p_1, p_2)}, d_{ellipse}(p_1, p_2) \geq 0, \quad (6)$$

Очевидно, что величины значений  $\Delta(p_1, p_2)$  и  $\delta(p_1, p_2)$  зависят в большей степени от удаленности точек на поверхности эллипсоида и в меньшей степени – от широты/долготы точек, поскольку разное положение точек на эллипсоиде определяет дуги разной длины из-за различной величины полуосей эллипсоида. Для наглядной оценки возникающей погрешности на рис. 7, 8 представлены графики зависимости величин  $\Delta(p_1, p_2)$  и  $\delta(p_1, p_2)$  от степени удаленности точек на поверхности эллипсоида, расположенных вдоль оси МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

Таким образом, возникающая погрешность становится соразмерной погрешности GPS/ГЛОНАСС навигаторов при расчете расстояний величиной более 200 км.

Далее рассчитаем значения  $\Delta h$ ,  $\delta h$  по формулам (5), (6):

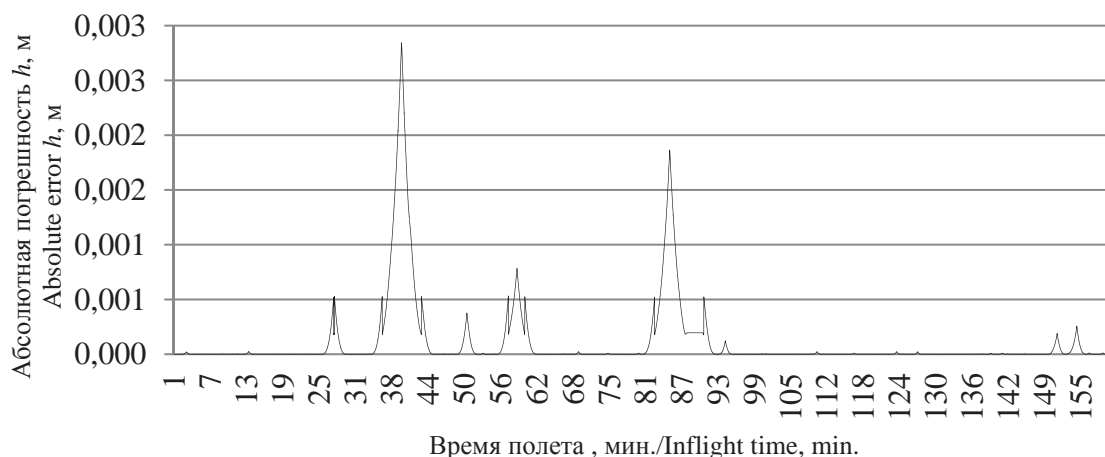


Рис. 9. Результаты расчета погрешности  $\Delta h$

Fig. 9. Results of the error  $\Delta h$  calculation



Рис. 10. Результаты расчета погрешности  $\delta h$

Fig. 10. Results of the error  $\delta h$  calculation

$$\Delta h = (d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, O^t) - d_{\text{xyz}}(s_{O_{\text{xyz}}}^t, O^t));$$

$$\delta h = \frac{\Delta h}{d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, O^t)}.$$

И значения  $\Delta s_{O_i}^t, \delta s_{O_i}^t$  по аналогичным формулам:

$$\Delta s_{O_i}^t = (d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, s_i^{\text{min}}) - d_{\text{xyz}}(s_{O_{\text{xyz}}}^t, s_i^{\text{min}}));$$

$$\delta s_{O_i}^t = \frac{\Delta s_{O_i}^t}{d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, s_i^{\text{min}})}.$$

На рис. 9–12 представлены графики значения погрешностей  $\Delta h, \delta h, \Delta s_{O_i}^t, \delta s_{O_i}^t$  для данных типового аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» (393–818 км).

Учитывая, что полученные значения  $\Delta h, \delta h, \Delta s_{O_i}^t, \delta s_{O_i}^t$  много меньше погрешности GPS/ГЛОНАСС навигаторов, можно пренебречь погрешностью, связанной с переходом к прямоугольной системе координат.

### Обработка данных обследования линейной части магистрального нефтепровода

Использование разработанной методики для решения задачи отображения географических координат позволяет обеспечить выделение информативных данных из множества географических координат подвижного объекта. При этом критерием отбора выбираем значение предельной величины удаленности объекта от оси ЛЧ МН  $h \leq h_{\text{max}}$ .

$$h_{\text{max}} = k_2 \cdot H,$$

где  $k_2 \geq 1$  – поправочный коэффициент типа проводимого мероприятия для учета максимального отклонения объекта от оси ЛЧ МН;  $H$  – ширина охранной зоны линейного объекта.

Значения охранных зон магистральных трубопроводов (в том числе МН) устанавливаются в специальных документах Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) [19]. Значения  $H$  для ос-

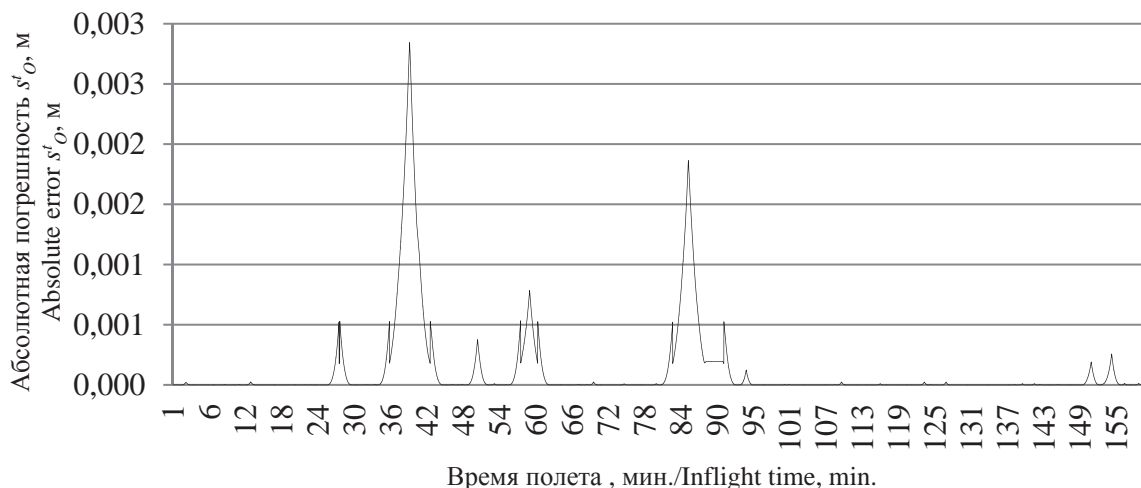


Рис. 11. Результаты расчета погрешности  $\Delta s_{O_i}^t$

Fig. 11. Results of the error  $\Delta s_{O_i}^t$  calculation



Рис. 12. Результаты расчета погрешности  $\delta s_{O_i}^t$

Fig. 12. Results of the error  $\delta s_{O_i}^t$  calculation

новых типов магистральных трубопроводов в РФ приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Ширина охранной зоны магистральных трубопроводов

**Table 2.** Width of the protected zone of the main pipelines

Тип объекта Object type	Совокупная ширина охранной зоны, м Overall width of the protected zone, m
Трассы трубопроводов, транспортирующих нефть, природный газ, нефтепродукты, нефтяной и искусственный углеводородные газы Pipeline routes, transporting oil, natural gas, oil products, oil and synthetic hydrocarbon gases	50
Трассы трубопроводов, транспортирующих сжиженные углеводородные газы, нестабильные бензин и конденсат Pipeline routes, transporting liquefied hydrocarbon gases, wild gasoline and unstable condensate	200
Подводные переходы трубопроводов Submerged crossing	200
Технологические установки подготовки продукции к транспорту, головные и промежуточные перекачивающие и наливные насосные станции, резервуарные парки, компрессорные и газораспределительные станции, узлы измерения продукции, наливные и сливные эстакады, станции подземного хранения газа, пункты подогрева нефти, нефтепродуктов Technological units for preparing products for transporting, main and intermediate transfer and bulk pump stations, tank batteries, compression and gas-distribution stations, product metering units, loading and discharge racks, stations of gas underground storage, oil and oil product heating stations	200

Для оценки качества обработки входных данных авторами были проанализированы данные аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» при  $h_{max}=200$  м. Результаты анализа представлены в табл. 3.

На основе полученных результатов можно оценить фактически осмотренную долю ЛЧ МН, которая колеблется от 80 до 90 % от запланированных показателей для представленных данных аэровизуального наблюдения. Следует также отметить, что использование такого подхода позволяет отбросить от 20 до 30 % неинформативных данных, учитывая достаточно большое среднее значение удаленности подвижного объекта от оси ЛЧ МН.

**Алгоритм сжатия данных обследования линейной части магистрального нефтепровода**

Рассмотрим возможность сжатия информативных данных, полученных в результате преобразования географических координат подвижных объектов по описанной выше методике. Учитывая, что эти данные представляют собой значения ши-

**Таблица 3.** Характеристики выделения информативных данных

**Table 3.** Characteristics of citing data selecting

Планируемый участок облета, км Proposed flyover area, km	Среднее отклонение Average deviation	Медиана отклонения Deviation median	Фактически осмотренный участок ЛЧ МН, км Really examined area of LP MP, km	Доля координат в охранной зоне МН Part of coordinate in the protected zone of the MP	
				Доля фактически осмотренной ЛЧ МН Part of the really examined LP MP	%
393–0	1011,78/38,74	47,14/45,13	359,6	74	91
393–818	237,84/46,61	51,58/56,66	341,240	78	80
393–818	271,35/58,46	61,42/47,99	336,401	74	79
393–0	438,11/45,72	49,6/39,39	358,872	70	91
393–0	272,11/55,17	51,93/44,63	343,042	75	87
393–0	1117,02/47,11	47,54/41,44	358,841	72	91
393–818	383,02/57,15	70,60/43,36	341,16	65	80
393–818	270,49/54,56	53,83/45,36	346,838	70	81

роты, долготы и высоты объекта  $s_o^t$ , зафиксированные через дискретные промежутки времени  $\Delta t$  от начальной точки отсчета  $\tau_o$ , сформулируем задачу преобразования уравнением:

$$(S_o^t, H_o^t, T_o^t) \rightarrow (S_o^t, T_o^t),$$

где  $S_o^t = \{s_{O_{ellipse}}^1, \dots, s_{O_{ellipse}}^t, \dots, s_{O_{ellipse}}^n\}$  – множество географических координат подвижного объекта;  $H_o^t = \{h_o^1, \dots, h_o^t, \dots, h_o^n\}$  – множество значений удаленности объекта от оси ЛЧ МН;  $T_o^t = \{\tau_o^1, \tau_o^t, \dots, \tau_o^n\}$  – множество отметок времени, для которых определялась координата подвижного объекта;

$$S_o^t = \{(s_{O_{km}}^1, s_{O_{km}}^{n1}), \dots, (s_{O_{km}}^t, s_{O_{km}}^{nt}), \dots, (s_{O_{km}}^m, s_{O_{km}}^{mm'})\}$$

– множество обследованных участков ЛЧ МН;

$$T_o^t = \{(t_o^1, t_o^{n1}), \dots, (t_o^t, t_o^{nt}), \dots, (t_o^m, t_o^{mm'})\}$$

– множество соответствующих им промежутков времени затраченных на обследование.

Определим алгоритм преобразования  $S_o^t \rightarrow S_o^t$ .  
Вход:

$$S_o^t = \{s_{O_{ellipse}}^1 \dots s_{O_{ellipse}}^n\}, T_o^t = (\tau_o^1, \{t_o^1 \dots t_o^n\}),$$

$$H_o^t = \{h_o^1 \dots h_o^n\}, h_{max}$$

Выход:

$$S_o^t = \{(s_{O_{km}}^1, s_{O_{km}}^{n1}) \dots (s_{O_{km}}^m, s_{O_{km}}^{mm'})\},$$

$$T_o^t = \{(t_o^1, t_o^{n1}) \dots (t_o^m, t_o^{mm'})\}.$$

**Шаг 1.** Если  $s_{O km}^t = s_{O km}^1$ , то  $h_0^{t-1} = h_{max} + 1$ ,  $s_{O km}^t = s_{O km}^1$ ,  $t_0^t = \tau_0^1$ .

**Шаг 2.** Если

$$((h_0^t > h_{max}) \wedge (h_0^{t-1} \leq h_{max})) \vee (s_{O km}^t = s_{O km}^1),$$

то, переход на **Шаг 3**, иначе  $s_{O km}^t = s_{O km}^{t+1}$ .

**Шаг 3.**

$$s_{O km}^{t+1} = s_{O km}^t, t_0^{t+1} = \tau_0^t + (t_0^t \cdot \Delta\tau),$$

$$S_0^t = S_0^t + (s_0^t, s_0^{t+1}), T_0^t = T_0^t + (t_0^t, t_0^{t+1}),$$

если  $s_{O km}^t \neq s_{O km}^1$ , то  $s_{O km}^t = s_{O km}^1$ ,  $t_0^t = \tau_0^1$ , переход на **Шаг 2**, иначе **Выход**.

Объем данных для хранения информации об обследовании ЛЧ МН определим по формулам:

$$Q(S_0^t, H_0^t, T_0^t) = Q(\text{datetime}) +$$

$$+ n(3 \cdot Q(\text{float}) + Q(\text{float}) + Q(\text{int}));$$

$$Q(S_0^t, T_0^t) = n'(2 \cdot Q(\text{float}) + 2 \cdot Q(\text{datetime})), \quad (7)$$

где  $Q(x)$  – количество информации в байтах для хранения величины  $x$ ;  $n$  – количество точек наблюдения подвижного объекта;  $n'$  – количество осматриваемых участков ЛЧ МН.

Тогда эффективность сжатия информативных данных составит:

$$k_{arch} = \frac{Q(S_0^t, H_0^t, T_0^t)}{Q(S_0^t, T_0^t)} = \frac{5}{6} \cdot \frac{n}{n'}$$

Восстановление сжатых данных о положении объекта  $s_{O km}^{t*}$  в момент времени  $t$  производится с помощью линейного уравнения:

$$s_{O km}^{t*} = s_{O km}^t + (s_{O km}^{t''} - s_{O km}^t) \cdot \frac{(t - t_0^t)}{(t_0^{t''} - t_0^t)}, t_0^t < t < t_0^{t''}, \quad (8)$$

где  $s_{O km}^{t*}$  – расчетное значение  $s_{O km}^t$ , восстановленное из сжатой информации об осматриваемых участках.

Значение географической координаты точки  $s_{O xyz}^{t*}$  в прямоугольных координатах:

$$s_{O xyz}^{t*} = \left( x_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s}, y_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s}, z_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s} \right),$$

где  $s_{O xyz}^{t*}$  – прямоугольные пространственные координаты точки  $s_0^{t*}$ ;  $s_i', s_i''$  – прилегающие к  $s_0^{t*}$  вершины ломаной  $S$ , такие, что  $s_i' < s_0^{t*} < s_i''$ ,  $\bar{s} = ((x_{s_i'} - x_{s_i}), (y_{s_i'} - y_{s_i}), (z_{s_i'} - z_{s_i}))$ .

$s_{O ellipse}^{t*} = (s_{O lat}^{t*}, s_{O lng}^{t*}, s_{O h}^{t*})$  рассчитаем по формуле (4) и, объединяя полученное значение с полученным по формуле (8) значением  $s_{O km}^{t*}$ , определим итоговую величину  $s_0^{t*} = (s_{O lat}^{t*}, s_{O lng}^{t*}, s_{O h}^{t*}, s_{O km}^{t*})$ .

#### Апробация алгоритма сжатия данных

В качестве хранилища, на основе которого проводилось сравнение объемов размещения данных, использовался сервер баз данных Microsoft SQL Server 2012 Express. Для хранения целых чисел использовался тип int (4 байта), чисел с плавающей запятой – тип данных float (4 байта), для хранения даты и времени – тип данных datetime

(8 байт). Объем данных для указанного хранилища рассчитаем по формуле (7):

$$Q(S_0^t, H_0^t, T_0^t) = 20 \cdot n;$$

$$Q(S_0^t, T_0^t) = 24 \cdot n'.$$

Результаты применения разработанного алгоритма сжатия для набора аэровизуальных наблюдений ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» в сентябре–ноябре 2014 г. представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Сравнение различных форм представления данных  
**Table 4.** Comparison of different forms of data introduction

Планируемый участок облета, км Proposed flyover area, km	n	n'	Кбайт/Kbyte		k <sub>arch</sub>
			Q(S <sub>0</sub> <sup>t</sup> , H <sub>0</sub> <sup>t</sup> , T <sub>0</sub> <sup>t</sup> )	Q(S <sub>0</sub> <sup>t</sup> , T <sub>0</sub> <sup>t</sup> )	
393-0	11842	27	236,84	0,648	365
393-818	9844	23	196,88	0,552	356
	5740	23	114,8	0,552	207
393-0	10343	24	206,86	0,576	359
	10560	26	211,2	0,624	338
	3714	20	74,28	0,48	154
393-818	13024	23	260,48	0,552	471
	13389	32	267,78	0,768	348

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что при отсутствии необходимости определения координаты количество информации для хранения данных передвижения подвижного объекта может быть уменьшено в несколько сотен раз и объем преобразованных данных составит менее одного процента от исходного.

На рис. 13 представлены результаты расчета погрешности интерполяции траектории мероприятия  $|s_{O km}^t - s_{O km}^{t*}|$ , то есть отклонения расчетной координаты на ЛЧ МН от реального положения объекта.

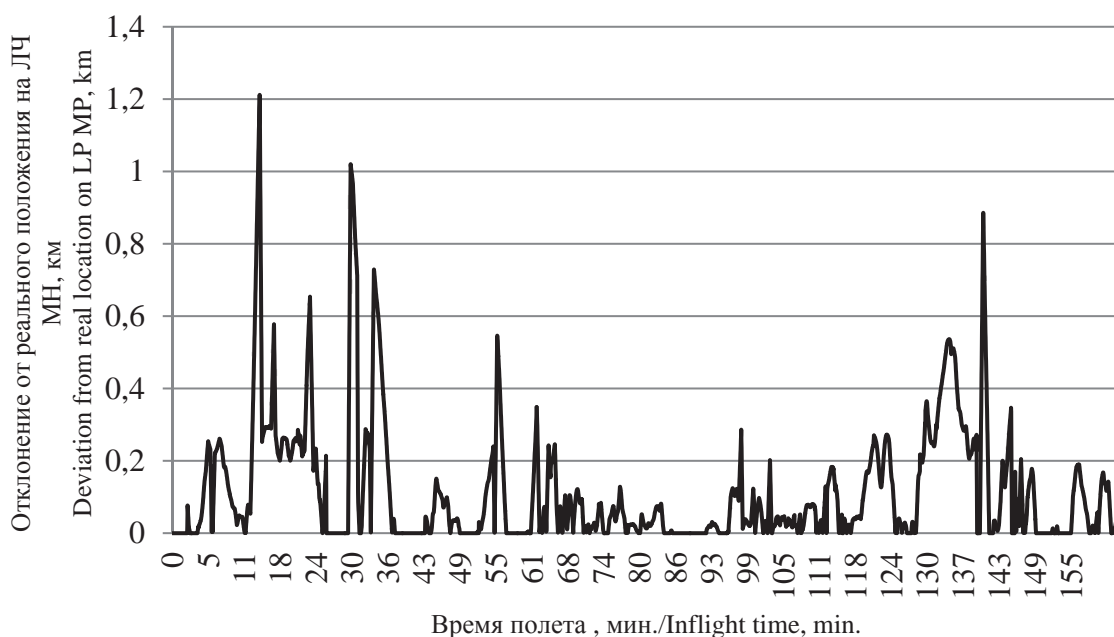
В табл. 5 отражена информация о положении объекта в виде элементов сжатого множества  $S_0^t, T_0^t$ , рассчитанного на основе данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» 396–613 км, использованного ранее для построения графика на рис. 13. Для каждого осматриваемого участка также была рассчитана средняя скорость перемещения подвижного объекта  $V_0^t$ .

**Таблица 5.** Результаты расчета  $S_0^t, T_0^t, V_0^t$

**Table 5.** Results of  $S_0^t, T_0^t, V_0^t$  calculation

s <sub>0</sub> <sup>t</sup>	s <sub>0</sub> <sup>t*</sup>	t <sub>0</sub> <sup>t</sup>	t <sub>0</sub> <sup>t*</sup>	V <sub>0</sub> <sup>t</sup> , км/ч
				(km/h)
км/км		мин/мин		
396,611	454	3	26	153,9496
464,996	469,65	29	31	140,7933
470,563	486,877	32	38	165,4377
500,416	502,4	43	44	166,1023
503,292	517,199	44	49	163,6118
525,292	538,788	52	57	160,8795
548,78	550,499	61	61	176,8114
550,907	585,557	61	74	162,6336
587,36	613,265	75	84	159,6884



Рис. 13. Результаты расчета  $|s_{0\text{ км}} - s_{0\text{ км}}^*|$ Fig. 13. Results of  $|s_{0\text{ км}} - s_{0\text{ км}}^*|$  calculation

Описанная выше методика и алгоритмы выделения и сжатия информативных данных в настоящее время проходят апробацию в АО «Транснефть – Центральная Сибирь» в виде автоматизированной системы учета и анализа мероприятий по охране ЛЧ МН [20]. С ее помощью решена задача преобразования GPS-треков, полученных в результате проведения мероприятий на ЛЧ МН, во множество обследованных участков, а также реализованы функции отображения информации об обследованных участках на свободно распространяемых географических картах [21].

#### Выводы

Сформулирована задача линейного отображения координат подвижного объекта к ЛЧ МН. Приведено описание методики для решения поставленной задачи на основе данных о дискретном наборе географических координат километровых участков ЛЧ МН. Предложенная методика реализует модифицированный метод линейного поиска точки ломаной линии до точки расположения подвижного объекта.

Представлены результаты использования данной методики для преобразования данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск», рассмотрены интерполяционные характеристики методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков ЛЧ МН.

Дана оценка погрешности алгоритмов методики, связанных с приближенным учетом эллипсоидной формы Земли при расчете расстояний между двумя точками на ее поверхности. Показано, что возникающая погрешность становится соразмерной погрешности GPS/ГЛОНАСС навигаторов

при расчете расстояний величиной более 200 км. Приведены результаты значения погрешности для данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

На основе значений охранных зон магистральных трубопроводов предложен способ выделения информативных данных из множества географических координат подвижного объекта с учетом предельной величины удаленности объекта от оси ЛЧ МН. Применение указанного способа для анализа набора данных об аэровизуальном наблюдении ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» позволило выявить и отбросить около 30 % неинформативных данных. Также с его помощью удалось оценить фактически осматриваемую долю ЛЧ МН, которая составила около 80 % от плановых показателей.

Показано, что дополнительным преимуществом совместного использования разработанной методики линейного отображения и способа выделения информативных данных является возможность сжатия информативных данных после их преобразования во множество обследованных участков ЛЧ МН и множество соответствующих им промежутков времени. Определена формула эффективности сжатия данных, которое достигается за счет линейной интерполяции координаты объекта. Рассмотрены результаты расчета отклонения смоделированного положения объекта от реального для данных аэровизуального наблюдения ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

Предложенная выше методика и алгоритмы реализованы в виде компоненты автоматизированной системы учета и анализа мероприятий по охране ЛЧ МН в АО «Транснефть – Центральная Сибирь».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ финансового состояния и результатов деятельности группы ОАО «АК «Транснефть». URL: <http://www.transneft.ru/investors/257/> (дата обращения: 28.05.2015).
2. Utilizing ArcGIS Location Referencing for Pipelines (ALRP). URL: <http://www.pods.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-UC-ArcGIS-for-PODS.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
3. Oracle Database Online Documentation. Linear Referencing System. URL: [http://docs.oracle.com/cd/B28359\\_01/appdev.111/b28400/sdo\\_lrs\\_concepts.htm](http://docs.oracle.com/cd/B28359_01/appdev.111/b28400/sdo_lrs_concepts.htm) (дата обращения: 28.05.2015).
4. Pipeline Open Data Standards. PODS Pipeline Data Model. URL: <http://www.pods.org/pods-model/what-is-the-pods-pipeline-data-model/> (дата обращения: 28.05.2015).
5. Allen J. I have seen the future of pipeline GIS. URL: <http://www.esri.com/~media/files/pdfs/industries/pipeline/pdfs/have-seen-the-future-pipeline-gis.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
6. U.S. Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. National Pipeline Mapping System. URL: <https://www.npms.phmsa.dot.gov/About.aspx> (дата обращения: 28.05.2015).
7. Кукало И.А. Привязка географических координат подвижного объекта к участку линейной части магистрального нефтепровода // Трубопроводный транспорт-2015: матер. X Междунар. учебно-научно-практ. конф. – Уфа, 2015. – С. 136–138.
8. Дворкин В.В., Карутин С.Н., Куршин В.В. Методика мониторинга глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью системы дифференциальной коррекции и мониторинга // Измерительная техника. – 2012. – № 3. – С. 32–37.
9. ПЗ-90.11. Параметры Земли 1990 года. Справочный документ. – М.: 27 ЦНИИ, 2014. – 52 с.
10. National geospatial-intelligence agency (NGA) standardization document. World Geodetic System 1984. Version 1.0.0. 2014–07–08. URL: [http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA\\_STND\\_0036\\_1\\_0\\_0\\_WGS84/NGA.STND.0036\\_1.0\\_0\\_WGS84.pdf](http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0_0_WGS84.pdf) (дата обращения: 28.05.2015).
11. Borre K., Strang G. Linear algebra, geodesy, and GPS. – USA: Wellesley-Cambridge Press, 1997. – 624 p.
12. Vincenty T. Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations. URL: [http://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/inverse.pdf](http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/inverse.pdf) (дата обращения: 28.05.2015).
13. ГОСТ 32453–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
14. Перепелица В.А., Тебуева Ф.Б. Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределенности данных: монография. – М.: Академия естествознания, 2007. – 152 с.
15. Weisstein E.W. Point-Line Distance 3-Dimensional. MathWorld - A Wolfram Web Resource. URL: <http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance3-Dimensional.html> (дата обращения: 28.05.2015).
16. Maplesoft Online. Projection of a Vector onto a Plane. URL: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=MathApps%2FProjectionOfVectorOntoPlane> (дата обращения: 28.05.2015).
17. Михеев С.Е. Численные методы. URL: <http://www.ap-math.spbu.ru/ru/staff/mikheev/files/numet6.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
18. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 635 с.
19. Госгортехнадзор России. Правила охраны магистральных трубопроводов // Библиотека стандартов, технических нормативно-правовых актов, действующих на территории РФ. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/2/2984/](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2984/) (дата обращения: 28.05.2015).
20. Кукало И.А., Гривцов С.Н. Оценка рисков физической безопасности линейной части магистрального нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 30–42.
21. OpenStreetMap – некоммерческий веб-картографический проект по созданию подробной свободной и бесплатной географической карты мира. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 28.05.2015).

Поступила 29.06.2015 г.

UDC 004.492.2

## LINEAR REFERENCING OF MOVING OBJECT GEO-COORDINATES TO THE LINEAR PART OF THE MAIN OIL PIPELINES

Ivan A. Kukalo,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: i@kukalo.ru

Sergey N. Grivtsov,

JSC «Transneft – Central Siberia», 24, Naberezhnaya Ushayki street, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

*The necessity of dynamic management of a large number of equipment and personnel performing the construction, repair, prevention and screening measures on pipelines makes the task of «snap» of moving object geographical coordinates to the linear part of the main pipeline urgent.*

*The main aim of the study is to develop the linear mapping technique of the moving object geographical coordinates to the linear part of the main pipeline, based on the data on a discrete set of its specific geographical origin.*

*The methods used in the study: vector algebra, geometry of the Earth spheroid, arithmetic error, heuristic methods of direct search methods of data compression, linear interpolation functions.*

**The results.** The authors have stated the problem of linear mapping coordinates of a moving object to the linear part of the main pipeline. The paper describes the methods of solving this problem based on the data on a discrete set of geographical coordinates of kilometer stretch of the linear part of the main pipeline and introduces the results of using the method for converting the data of aerovisual observation of the site of the linear part of the main pipeline «Aleksandrovsky – Anzhero-Sudzhensk»; considers the interpolation properties of the technique with a lack of information on the geographical coordinates of kilometer stretch of the linear part of the main pipeline. The authors estimated the error of the method based on these assumptions, which does not take into account the elliptical shape of the earth in the calculation of the distance between two points on the earth's surface. The estimation error for the data of aerovisual observation site of the linear part of the main pipeline «Aleksandrovsky – Anzhero-Sudzhensk» was calculated. The authors proposed the method for processing information on a set of geographical coordinates of the mobile object based on the limit value of the object distance from the axis of the linear part of the main pipeline for the given configuration of pipelines security zones. It is shown that the sharing of the developed technique of linear mappings and data processing method makes it possible to compress the data on the trajectory of the moving object after converting them into a variety of areas surveyed of the linear part of the main pipeline.

**Key words:**

Oil pipeline, linear referencing system, geographical coordinates, aerial surveillance, data compression with losses.

**REFERENCES**

1. *Analiz finansovogo sostoyaniya i rezultatov deyatel'nosti gruppy OAO «AK «Transneft»* [Analysis of financial condition and results of operations of OJSC «AK «Transneft»] Available at: <http://www.transneft.ru/investors/257/> (accessed 28 May 2015).
2. *Utilizing ArcGIS Location Referencing for Pipelines (ALRP)*. Available at: <http://www.pods.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-UC-ArcGIS-for-PODS.pdf> (accessed 28 May 2015).
3. *Oracle Database Online Documentation. Linear Referencing System*. Available at: [http://docs.oracle.com/cd/B28359\\_01/appdev.111/b28400/sdo\\_lrs\\_concepts.htm](http://docs.oracle.com/cd/B28359_01/appdev.111/b28400/sdo_lrs_concepts.htm) (accessed 28 May 2015).
4. *Pipeline Open Data Standards. PODS Pipeline Data Model*. Available at: <http://www.pods.org/pods-model/what-is-the-pods-pipeline-data-model/> (accessed 28 May 2015).
5. Allen J. *I have seen the future of pipeline GIS*. Available at: <http://www.esri.com/~media/files/pdfs/industries/pipeline/pdfs/have-seen-the-future-pipeline-gis.pdf> (accessed 28 May 2015).
6. *U.S. Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. National Pipeline Mapping System*. Available at: <https://www.npms.phmsa.dot.gov/About.aspx> (accessed 28 May 2015).
7. Kukalo I.A. Privyazka geograficheskikh koordinat podvizhnogo obekta k uchastku lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [Binding of geographical coordinates of the movable object to the linear part of the main pipeline]. *Materialy X Mezhdunarodnoy uchebno-nauchno-prakticheskoy konferentsii «Truboprovodny transport-2015»* [Pipeline transport-2015. Proc. 10<sup>th</sup> Int. educational and scientific-practical Conf.]. Ufa, 2015. pp. 136–138.
8. Dvorkin V.V., Karutin S.N., Kurshin V.V. Metodika monitoringa globalnoy navigatsionnoy sputnikovoy sistemy GLONASS s pomoshchyu sistemy differentsialnoy korrektsii i monitoringa [Method for monitoring the GLONASS global navigation satellite system by means of a differential correction and monitoring system]. *Measurement Techniques*, 2012, no. 3, pp. 32–37.
9. *PZ-90.11. Parametry Zemli 1990 goda. Spravochny document* [The parameters of the Earth in 1990. Background paper]. Moscow, 27 TsNII, 2014. 52 p.
10. *National geospatial-intelligence agency (NGA) standardization document*. World Geodetic System 1984. Version 1.0.0. 2014–07–08. Available at: [http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA\\_STND\\_0036\\_1\\_0\\_0\\_WGS84/NGA.STND.0036\\_1.0.0\\_WGS84.pdf](http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf) (accessed 28 May 2015).
11. Borre K., Strang G. *Linear algebra, geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, 1997. 624 p.
12. Vincenty T. *Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations*. Available at: [http://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/inverse.pdf](http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/inverse.pdf) (accessed 28 May 2015).
13. GOST 32453–2013. *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyayemykh tochek* [State Standard 32453–2013. Global Navigation Satellite System. Coordinate system. Methods of coordinate transformations defined by points]. Moscow, Standartinform, 2014. 20 p.
14. Perepelitsa V.A., Tebueva F.B. *Diskretnaya optimizatsiya i modelirovanie v usloviyakh neopredelennosti dannykh* [Discrete optimization and modeling in conditions of uncertainty of data]. Moscow, The Academy of Natural Science Publ., 2007. 152 p.
15. Weisstein E.W. *Point-Line Distance 3-Dimensional*. *MathWorld - A Wolfram Web Resource*. Available at: <http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance3-Dimensional.html> (accessed 28 May 2015).
16. *Maplesoft Online. Projection of a Vector onto a Plane*. Available at: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=MathApps%2FProjectionOfVectorOntoPlane> (accessed 28 May 2015).
17. Mikheev S.E. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Available at: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/staff/mikheev/files/numet6.pdf> (accessed 28 May 2015).
18. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2012. 635 p.
19. Gosgortekhnadzor Rossii. *Pravila okhrany magistralnykh truboprovodov* [Gosgortekhnadzor Russia. Regulations for protection of pipelines]. *Biblioteka standartov, tekhnicheskikh normativno-pravovykh aktov, deystvuyushchikh na territorii RF* [Library of standards, technical regulations and regulations in force in the territory of the Russian Federation]. Available at: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/2/2984/](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2984/) (accessed 28 May 2015).
20. Kukalo I.A., Grivtsov S.N. Otsenka riskov fizicheskoy bezopasnosti lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [Risk assessment of linear part physical safety in the main oil pipeline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 30–42.
21. *OpenStreetMap – nekommercheskiy veb-kartograficheskii projekt po sozdaniyu podrobnoy svobodnoy i besplatnoy geograficheskoy karty mira* [OpenStreetMap – a non-profit web-mapping project to create a more free and a free map of the world]. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 28 May 2015).

Received: 29 June 2015.

УДК 537.855

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРНЫХ ПОРОШКОВЫХ КРАСОК ДЛЯ ЗАЩИТЫ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Панин Сергей Викторович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении» Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; заместитель директора по научной работе Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Языков Сергей Юрьевич,**

инженер-технолог открытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Полюс», Россия, 634041, г. Томск, пр. Кирова, 56б. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Даммер Владислав Христианович,**

канд. техн. наук, начальник отдела 28 открытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Полюс», Россия, 634041, г. Томск, пр. Кирова, 56б. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Овечкин Борис Борисович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение в машиностроении» Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ovechkinb@tpu.ru

**Суслев Валентин Иванович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники Национального исследовательского Томского государственного университета; директор ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: susl@mail.tsu.ru

**Дорожкин Кирилл Валерьевич,**

инженер ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: km007@sibmail.com

*В работе исследовали возможность придания покрытию на основе полиэфирной порошковой краски экранирующих свойств для защиты магниевых сплавов за счет введения порошка нержавеющей стали и обработки порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице. При варьировании времени механообработки и содержания наполнителя исследовали свойства порошковых смесей, структуру и свойства покрытий. Ключевой задачей исследования являлось разработать покрытия, обладающие исходными физико-механическими свойствами, характерными для ненаполненной порошковой краски, при придании им нового функционального качества – экранирования электромагнитного излучения (ЭМ-излучения). Обработку порошковых смесей проводили в планетарной мельнице МП 4/0,5 при суммарной частоте вращения стаканов 800 об/мин. Частицы наполнителя и порошковую краску в необходимых количествах загружали в планетарную мельницу, где происходила их совместная механическая обработка в течение 20–80 мин с шагом по времени 10 мин. Влияние времени механической обработки на свойства порошковой смеси оценивали по данным измерения насыпной плотности. В результате комплекса испытаний, имитирующих различные атмосферные и механические воздействия, установлено, что разработанное покрытие с содержанием наполнителя 20 об. % при времени механообработки порошковой смеси в планетарной мельнице 40 мин обеспечивает формирование пленки покрытия толщиной 70 мкм, обладающей требуемыми функциональными и защитными свойствами. Таким образом, предложенный способ формирования покрытий на деталях из магниевых сплавов, сочетающий введение экранирующего наполнителя, обработку порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице и электростатическое напыление, может использоваться для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, работающих в условиях открытого космоса. Результаты проведенных исследований могут быть использованы в прикладных задачах технологий георесурсов при создании аппаратуры, применяемой на космических аппаратах для мониторинга и разведки полезных ископаемых.*

### **Ключевые слова:**

Мониторинг георесурсов, порошковая краска, порошок стали X17H2, экранирование, планетарная шаровая мельница, защитное покрытие.

### Цель работы

В настоящее время для мониторинга и разведки георесурсов активно применяются космические аппараты, на борту которых устанавливается радиоэлектронная аппаратура. Широкое распространение получили геоинформационные системы (ГИС), например SS Tool Vox, Адепт ИС, Field Rover II, Map Info и т. д. Указанная радиоэлектронная аппаратура размещается в блоках, изготовленных из магниевых сплавов, при этом значительное внимание конструкторов уделяется обеспечению их надежной защиты от воздействия внешних (в т. ч. климатических) факторов, способных вызвать коррозионные повреждения [1–3].

Тенденция развития радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), устанавливаемой на борту космических аппаратов (КА), ориентирована в направлении внедрения цифровых технологий, повышения тактовых частот обработки информации, расширения спектра обрабатываемых сигналов. Одновременно минимизируются ее массогабаритные параметры, увеличивается плотность компоновки в объеме КА. Это создает дополнительные сложности с позиции обеспечения аспектов электромагнитной совместимости (ЭМС) приборов и узлов бортовой РЭА [4, 5]. Кроме того, вследствие неизбежного увеличения поглощенной дозы космического излучения и излучения естественного радиационного поля Земли в наиболее чувствительной части спутника – электро-радиоизделиях (ЭРИ) бортовой радиоэлектронной аппаратуры – может происходить снижение живучести КА в целом [6–8]. По этой причине приоритетным направлением современного развития авиакосмической отрасли является увеличение срока эксплуатации космических аппаратов до десяти и более лет.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения накопленной дозы излучения является применение защитных материалов/покрытий, обеспечивающих экранирование ЭРИ от потоков излучения [9, 10]. В настоящее время для создания таких материалов используются радиопрозрачные полимерные матрицы с дисперсными наполнителями (металлическими, углеродными) [11].

Использование порошковых красок – эффективный способ коррозионной защиты изделий, в том числе изготовленных из магниевых сплавов. Помимо этого, за счет введения порошковых наполнителей им могут быть приданы дополнительные функциональные свойства, в частности возможность экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ). Таким образом, создание защитных функциональных покрытий подобного класса с использованием модифицированных (наполненных) порошковых красок и порошковых технологий их получения является актуальной научно-технической задачей.

Из известных методов введения наполнителей в порошковые краски наиболее простым и экономичным является метод сухого смешения, позволяющий равномерно распределить наполнитель в

полимерном связующем. Однако наполнитель, являющийся отличным по химическому составу и свойствам, мешает равномерному растеканию и слиянию расплавленных частиц при пленкообразовании. В результате снижается однородность покрытия, наблюдается образование пор, снижается адгезия к подложке, может происходить его растрескивание. В одной из работ по этой тематике было показано, что содержание наполнителя в подобного рода композициях не должно превышать 23 об. % [12].

Известно, что наибольшей тормозной способностью ослабления электронов, отнесенной к единице массы защиты (т. е. потерей энергии в МэВ на единицу массовой толщины защиты в г/см), обладают легкие элементы с низким атомным номером. В то же время в тяжелых элементах сечение упругого взаимодействия с электронами выше, чем в легких, что приводит к снижению длины пробега электрона в защите за счет рассеяния и, соответственно, к увеличению энергетических потерь электронов на единицу толщины защиты. Именно по этой причине большинство разработчиков электромагнитной защиты идут по пути наполнения материалов частицами тяжелых элементов (например, Poly Rad от компании Longhill Technologies или RAD-PAK от Maxwell Technologies) [13–15]. В связи с этим одним из возможных путей решения данной проблемы является использование порошка нержавеющей стали.

В настоящей работе эффект придания покрытию экранирующих свойств достигался путем совместной обработки порошков в планетарной шаровой мельнице (ПШМ) [16, 17]. В качестве наполнителя использовали промышленный порошок нержавеющей стали X17H2 (ГОСТ 13084–88), изготовленный методом совместного восстановления смеси оксидов металлов и металлических порошков гидридом кальция, с максимальным размером частиц порошка 150 мкм, имеющих дендритную форму (рис. 1) [18].

В ходе работы решались следующие задачи:

- разработать порошковые смеси и исследовать структуру и свойства покрытий, придание экранирующих свойств которым достигнуто за счет введения в порошковую краску порошка стали марки X17H2 и последующей их совместной обработки в планетарной мельнице;
- исследовать структуру композиционных покрытий на основе порошковой краски, обладающих исходными физико-механическими свойствами (прежде всего, адгезией), с одновременным приданием им принципиально новой функций – экранирования ЭМИ.

### Объект исследования

В качестве полимерного связующего выбрана порошковая полиэфирная краска ОХТЭК-1 (ООО «Технос-Охтэк», Россия), имеющая высокие антикоррозионные и физико-механические характеристики. Наполнителем, обеспечивающим необходи-

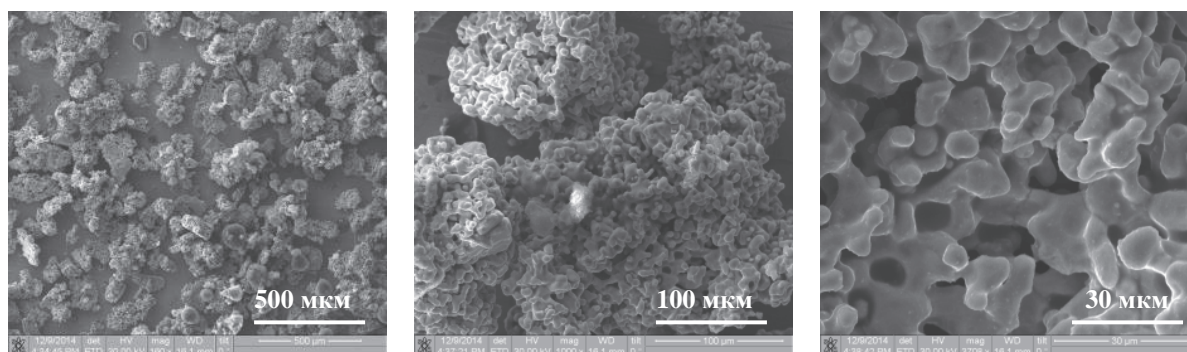


Рис. 1. РЭМ-изображение порошка стали X17H2 при разном увеличении

Fig. 1. SEM-micrograph of Cr17Ni2 stainless steel powder at various magnification

мые экранирующие свойства, являлся порошок стали марки X17H2. Исходный порошок стали, который добавляли в краску, имел дисперсность до 70 мкм. Объектом исследования служила порошковая композиция, нанесенная на подложки, изготовленные из магниевого сплава МА 2–1.

Обработку порошковых смесей проводили с помощью планетарной мельницы МП 4/0,5 (ООО «Техноцентр», г. Рыбинск) при суммарной частоте вращения стаканов 800 об/мин. Соотношение массы шаров и порошка составляло 40:1. Стальной порошок и порошковую краску в необходимых количествах загружали в планетарную мельницу, где происходила их совместная механическая обработка (МО) в течение 20...80 мин с шагом по времени 10 мин. Влияние времени механической обработки на свойства порошковой смеси оценивали по данным измерения насыпной плотности.

Для дробления крупных агломератов частиц, образовавшихся в процессе МО порошковой смеси, использовали вибросито с ячейей 160 мкм. Для напыления покрытия использовали фракцию смеси дисперсностью менее 50 мкм, выделенную ситовым анализом. Таким образом, частицы наполнителя в составе напыляемой шихты также имели дисперсность менее 50 мкм.

Изготовленные порошковые композиции наносили электростатическим способом с помощью установки «Старт-50» на подложки из магниевого сплава с оксидхроматным подслоем (покрытием). Дополнительно, в качестве подложек для получения сколов и последующего фрактографического анализа покрытий, использовали образцы высокоуглеродистой стали (ножовочные полотна). В процессе последующего запекания при температуре 180 °С в течение 15 мин были сформированы покрытия толщиной 50...80 мкм.

#### Методы исследования

Шероховатость полученных покрытий измеряли с помощью прибора TR-100 Surface roughness tester (Shenzhen Laesent Technology Co., Ltd., Китай). Структуру покрытий исследовали методом растровой электронной микроскопии на приборе Quanta 200 3D (FEI, США – в Центре коллективно-

го пользования ТГУ). Для анализа морфологии делали поперечный скол покрытий, нанесенных на стальную подложку. Коррозионные испытания проводили в климатических камерах по режиму УХЛ 2 (метод 13 ГОСТ 9.401–91).

Измерение намагниченности образцов проводили с помощью анализатора шумов Баркгаузена «Интраскан» (Россия, ООО «Фирма РКК»). Метод шумов Баркгаузена, или магнитоупругий метод, основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумоподобных сигналов – шумов Баркгаузена, которые генерируются в ферромагнитном образце при приложении магнитного поля. На амплитуду шумов Баркгаузена (или магнитоупругий параметр) оказывают влияние любые явления, препятствующие движению доменных стенок, к которым относятся дефекты, например инородные включения, трещины, а также остаточные напряжения и микроструктура. Предполагалось, что увеличение содержания частиц металлического наполнителя будет сопровождаться повышением его магнитных свойств и, соответственно, уровнем шумов Баркгаузена.

Измерения коэффициентов отражения и прохождения от плоского слоя материала и спектры комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 118–258 ГГц осуществлены методом «свободного пространства» на спектрометре терагерцевого диапазона СТД-21 {С1–С6} в центре коллективного пользования (ЦКП) «Центр радиозмерений ТГУ», аккредитованного на техническую компетентность [19, 20].

Для исследования электромагнитного отклика с целью определения возможности применения разработанного материала как отражающего или поглощающего был выбран терагерцевый диапазон частот. В этом диапазоне аппаратные средства обладают высокой чувствительностью, малой инерционностью, а также удобной формой представления сигнала, что и делает его привлекательным. Радиоспектроскоп терагерцевого диапазона СТД-21 – универсальный, многоцелевой инструмент для фундаментальных исследований, применимый для изучения характеристик материалов и устройств. Он позволяет прямым, бесконтактным

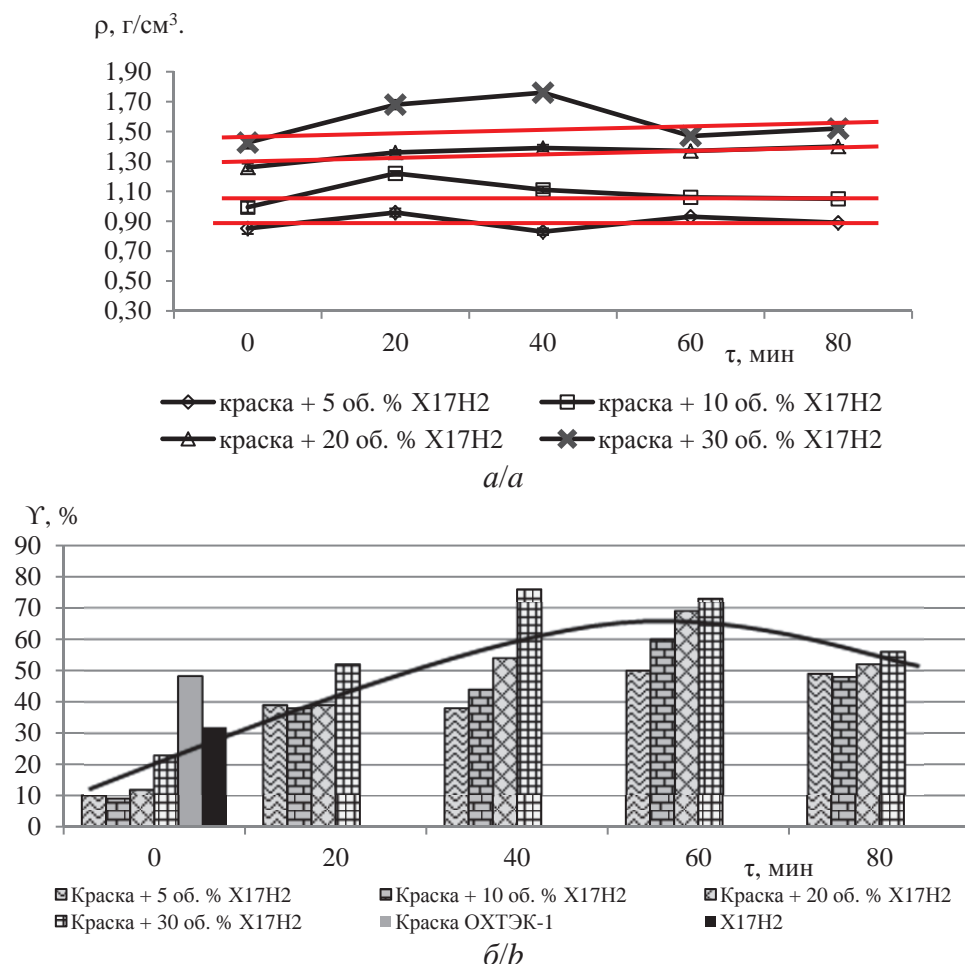
методом быстро и точно получить спектры абсолютных значений модулей и фаз составляющих электродинамического отклика: комплексных коэффициентов отражения –  $R^*(f)=R(f)e^{i\varphi(f)}$ , прохождения –  $Tr^*(f)=Tr(f)e^{i\varphi(f)}$  от образца в режиме реального времени. В настоящий момент спектрометр не имеет аналогов по точности и скорости работы. Рабочий диапазон: 0,03–1,5 ТГц.

По измеренным модулям и фазам прошедшего и отраженного сигналов можно вычислить величины комплексной диэлектрической проницаемости материала:  $\varepsilon^*=\varepsilon'-\varepsilon''$ . Величина  $\varepsilon^*$  характеризует сформировавшуюся структуру композита, позволяет выделить физические механизмы, определяющие электродинамические свойства, поэтому ее можно использовать для моделирования электромагнитного отклика конструкций разных форм и толщин.

### Результаты исследований

Целью совместной обработки порошковой краски и порошка стали X17H2 в планетарной шаро-

вой мельнице является решение проблемы введения максимального количества частиц наполнителя, придающего требуемые функциональные свойства, при сохранении либо минимальном снижении исходных механических свойств покрытия (прежде всего, адгезии). Содержание частиц наполнителя в смеси составляло: 5; 10; 20; 30 об. % [21]. При этом время обработки в планетарной мельнице варьировали и оценивали изменение насыпной плотности исследуемых порошковых смесей (рис. 2, а). Видно, что насыпная плотность тем выше, чем больше содержание в смеси частиц стали, что объясняется их более высокой плотностью по сравнению с порошковой краской. С другой стороны, ожидаемого увеличения насыпной плотности в результате обработки порошковой смеси в планетарной мельнице во всем исследованном диапазоне времени МО 20–80 мин не наблюдается. Данный эффект в отношении краски может быть обусловлен ее высокой эластичностью, а в случае порошка стали – пластичностью/деформируемостью (рис. 3). Таким образом, с



**Рис. 2.** Свойства смесей на основе порошковой краски при различном времени МО: а) насыпная плотность смеси «ПК+порошок стали»; б) доля (процентное содержание) частиц фракции меньше 50 мкм (по данным ситового анализа) при различных временах обработки в ПШМ

**Fig. 2.** Properties of blends based on powder paints at various times of Mechanical Treatment (MT): а) packing density of the blend «powder paint + stainless steel powder»; б) histogram of percentage of particles with the size less than 50 μm (through the data of sieve analysis) at various MT time

позиции выбора оптимального времени обработки порошковой смеси в ПШМ по параметру «насыпная плотность» сделать какого-либо однозначного заключения с позиции подбора технологических параметров обработки порошковых смесей не представляется возможным.

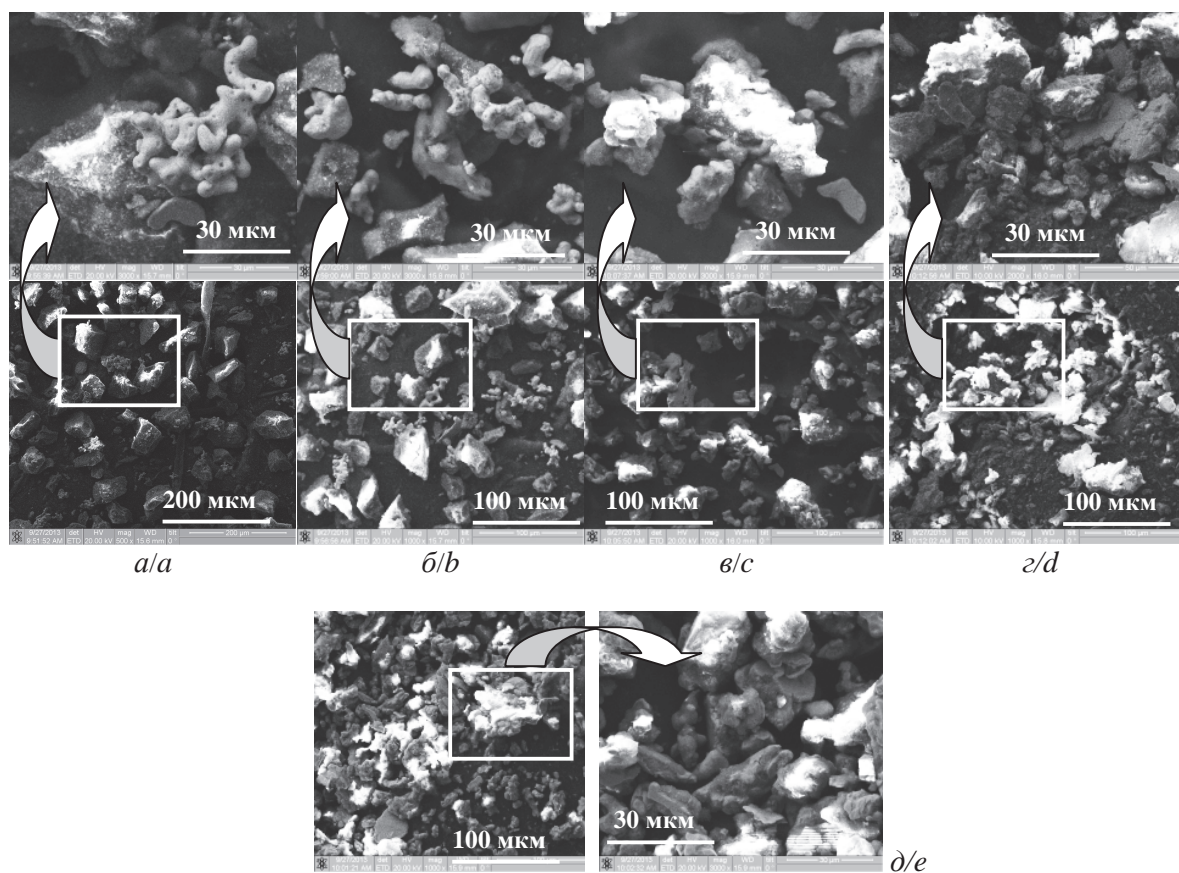
Далее для исследования влияния времени механообработки на измельчение частиц в составе порошковых смесей для всех приготовленных композиций был проведен ситовой анализ. Его целью являлось определение количества (доли) частиц, имеющих дисперсность менее 50 мкм, поскольку именно эту фракцию применяли для электростатического напыления. Данные таких исследований представлены в виде гистограммы на рис. 2, б. Видно (колонка, соответствующая времени  $t=0$ ), что для смеси порошков краски и стали, не подвергавшейся механообработке (при этом смешение также проводилось в планетарной мельнице, но при низкой частоте вращения стаканов – 100 об/мин, что не приводит к сколько-либо заметному воздействию на порошковую смесь), доля фракции  $\leq 50$  мкм составляет от 10 до 22 %, что меньше, чем в исходных компонентах: для порошковой краски ОХТЭК-1  $\gamma=49$  %; для порошка стали Х17Н2  $\gamma=31$  %. По мнению авторов, это вызва-

но тем, что в процессе смешения порошковая краска может накапливать заряд вследствие трибоэлектрического эффекта. В результате частицы краски и наполнителя оказываются агломерированными и не проходят через ячейки сита  $\leq 50$  мкм.

Последовательное увеличение времени обработки порошковой смеси в ПШМ приводит к возрастанию доли частиц размером менее 50 мкм. Оптимальным временем обработки при этом следует считать 60 мин, когда для всех исследованных композиций доля частиц размером  $\leq 50$  мкм составляла не менее 50 % (в среднем – 60 %). Дальнейшее увеличение времени обработки смесей в планетарной шаровой мельнице до 80 мин приводит к постепенному снижению количества мелких частиц (рис. 2, б). Данный факт хорошо согласуется с многочисленными литературными данными по обработке порошковых смесей в ПШМ, и может быть интерпретирован как следствие агломерации частиц [22]. Определенное подтверждение данный факт находит при наблюдении порошковых смесей в растровом электронном микроскопе (рис. 3, в, г).

Таким образом, по данным, приведенным на рис. 2, б, можно сделать следующие обобщения:

1. В результате механического смешения порошковой краски и наполнителя без применения



**Рис. 3.** РЭМ-изображения порошка смеси при разном увеличении, содержании наполнителя (об. %) и времени механической обработки (мин): а) 5, 0; б) 30, 0; в) 5, 80; г) 30, 80; д) 20, 40

**Fig. 3.** SEM-micrographs of powder mixtures at various magnification, filler volume fraction (vol. %) and MT time (minutes): а) 5, 0; б) 30, 0; в) 5, 80; г) 30, 80; д) 20, 40



механообработки количество частиц фракции, пригодной для напыления (менее 50 мкм), составляет порядка 10–20 %, что значительно меньше такого в исходных компонентах смеси. Причиной этого явления, наиболее вероятно, является агломерирование частиц краски и наполнителя.

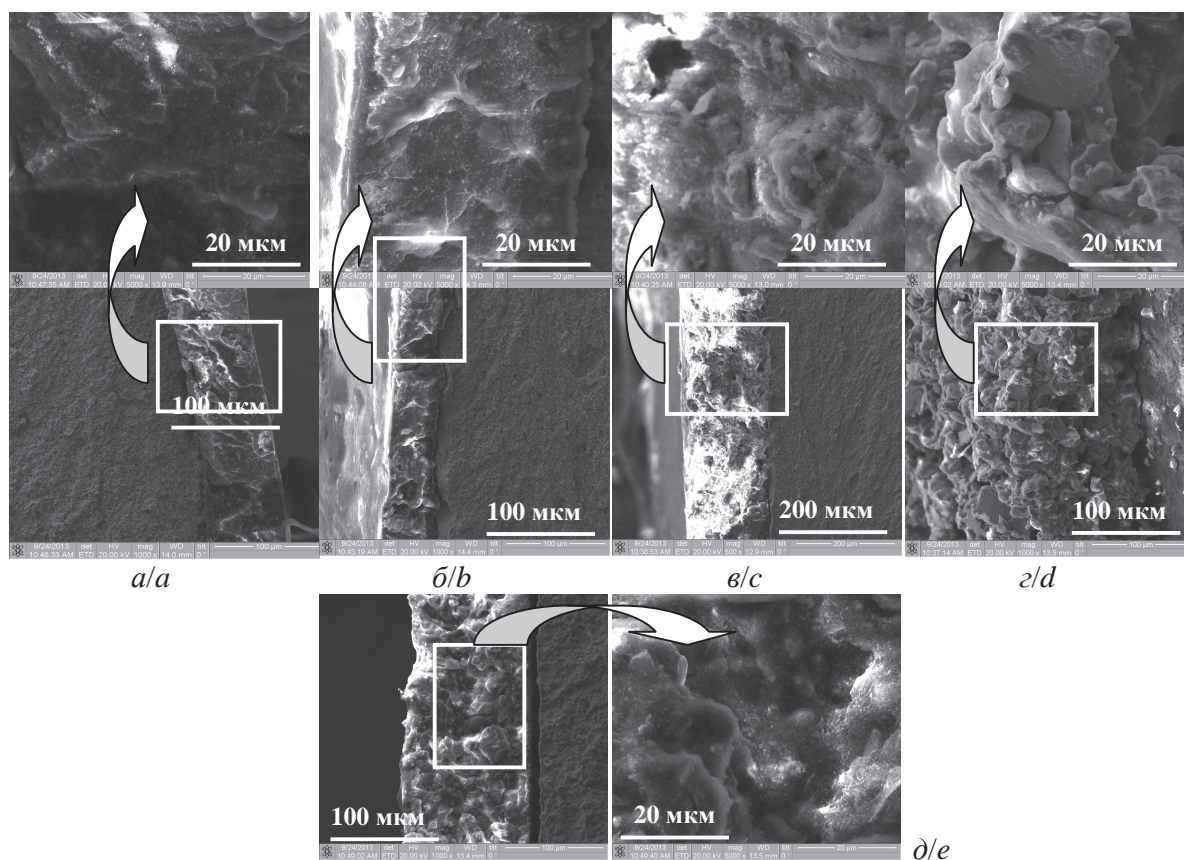
2. При времени механообработки порошковой смеси 20 мин наблюдается образование значительного количества пригодной для напыления фракции, составляющее примерно 40 % (рис. 2, б).
3. В интервале времени обработки в ПШМ от 40 до 60 мин наблюдается формирование максимального количества фракции порошковой смеси размером менее 50 мкм (50–75 %), применяемой для напыления. Механообработка смеси свыше 60 минут является нецелесообразной, поскольку количество частиц, пригодных для напыления, снижается.

Для характеристики порошковой смеси перед ее последующим электростатическим напылением проведены ее исследования на растровом электронном микроскопе (рис. 3). Видно, что компоненты порошковых смесей без обработки в ПШМ имеют неправильную форму и заметно диспергированы (рис. 3, а, б). При последующей механооб-

работке (время обработки ?40 минут) происходит разрушение агломерированных частиц, а также совместная деформация частиц порошка стали (рис. 3, д). Дальнейшее увеличение времени обработки до 80 мин сопровождается формированием крупных агломерированных фрагментов размером более 50 мкм, что может быть обусловлено совместной деформацией частиц краски и наполнителя (рис. 3, б, з). Причиной этого также может являться постепенный нагрев порошковой смеси, вызванный длительным механическим воздействием мелющими телами.

#### Структура и свойства покрытий

Проведенные с помощью растрового микроскопа структурные исследования напыленных покрытий показали следующее. Изменение содержания порошка нержавеющей стали от 5 до 30 об. % в смеси, не подвергавшейся обработке в ПШМ, практически не сопровождается изменением структуры. В результате покрытие является практически беспористым и однородным. Дополнительное сопоставление с данными измерения шумов Баркгаузена свидетельствует о том, что в составе такого покрытия частицы железа практически не содержатся. Это означает, что основная роль обработки по-



**Рис. 4.** РЭМ-изображения сколов покрытий с различным содержанием наполнителя и временем обработки (мин): а) 5 об. % X17H2, 0; б) 30 об. % X17H2, 0; в) 5 об. % X17H2, 80; г) 30 об. % X17H2, 80; д) 20 об. % X17H2, 40

**Fig. 4.** SEM-micrographs of fracture surfaces of powder paint based coatings with various filler content and MT time (minutes): а) 5 vol. % Cr17Ni2, 0; б) 30 vol. % Cr17Ni2, 0; в) 5 vol. % Cr17Ni2, 80; г) 30 vol. % Cr17Ni2, 80; д) 20 vol. % Cr17Ni2, 40

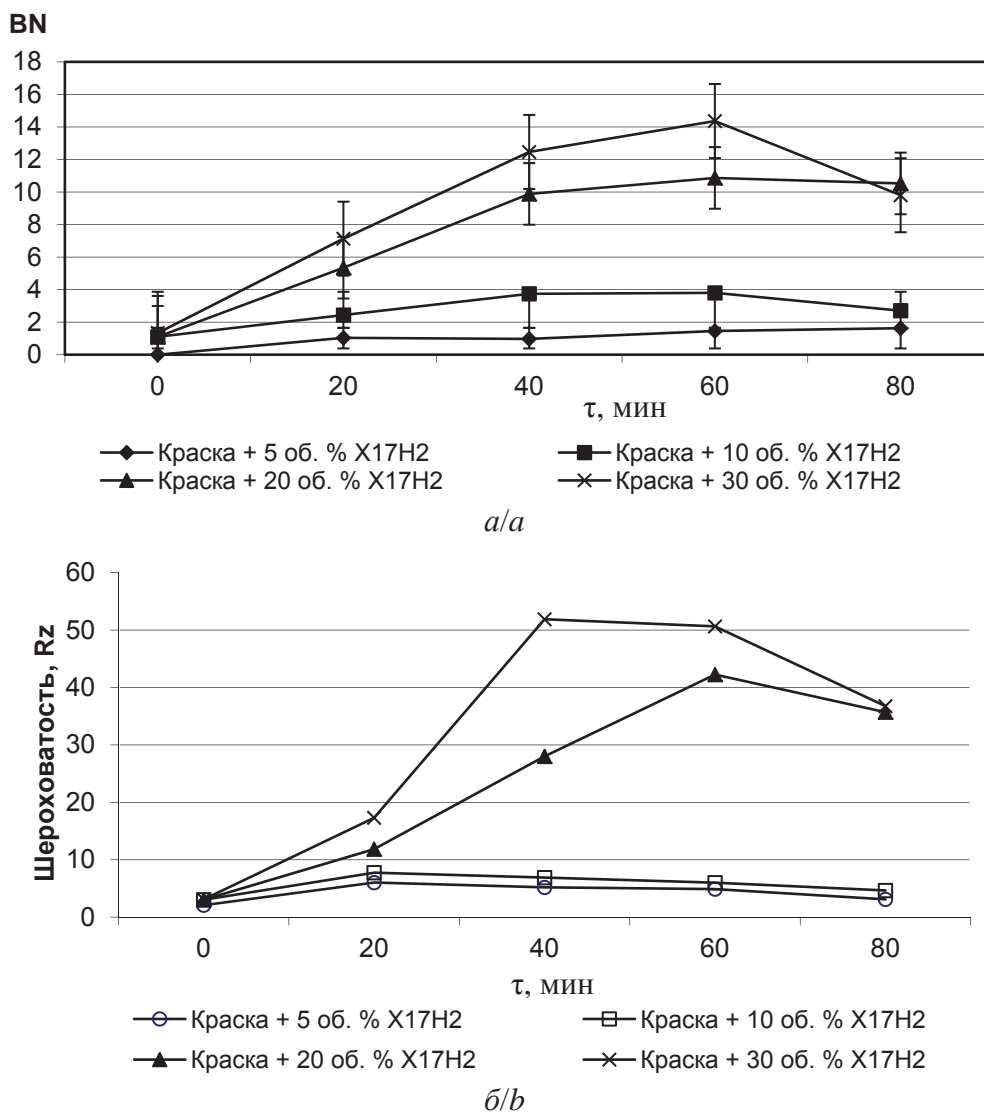
рошковой смеси в ПШМ сводится к механическому соединению (легированию) частиц краски порошками стали, в результате чего обе компоненты смеси долетают до подложки при электростатическом напылении. При содержании частиц железа 20 об. % (рис. 4, д) покрытие является сплошным, хотя его структура – гетерогенная, вследствие наличия заметного количества частиц нержавеющей стали.

Это подтверждается данными измерения шумов Баркгаузена для таких образцов (рис. 5, а, кривая 3). Сравнение структуры покрытий, напыленных из порошковых смесей, предварительно обработанных в ПШМ в течение 80 мин, показало, что при содержании порошка железа 5 об. % покрытие является относительно однородным и сплошным (рис. 4, е). Однако его магнитные свойства являются крайне низкими (рис. 5, а, кри-

вая 4). С другой стороны, при введении в порошковую смесь 30 об. % порошка нержавеющей стали структура формирующегося покрытия является неудовлетворительной: налицо высокая пористость и отсутствие связи между связующим и наполнителем. В то же время магнитные свойства являются высокими.

Таким образом, сопоставляя данные рис. 5, а, б можно констатировать, что наиболее оптимальным с позиции формирования структуры и сохранения свойств адгезии (рис. 7) является покрытие с содержанием 20 об. % наполнителя и временем обработки 40 мин.

**Обсуждение результатов.** Приготовленные и обработанные в ПШМ порошковые смеси (фракция менее 50 мкм) напылялись на подложки из магния и высокоуглеродистой стали. Степень придания покрытиям функциональных свойств оцени-



**Рис. 5.** Свойства композиционных покрытий при различном времени МО: а) степень намагниченности (уровень шумов Баркгаузена); б) шероховатость поверхности (Rz) при разном содержании наполнителя (5–30 об. %)

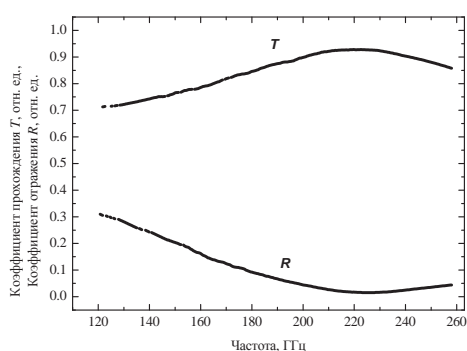
**Fig. 5.** Properties of composite coatings at various MT time: а) magnetization degree (level of Barkhausen noise); б) surface roughness (Rz) at different filler content

вали путем измерения остаточной намагниченности (рис. 5, а). Анализ полученных результатов показал, что:

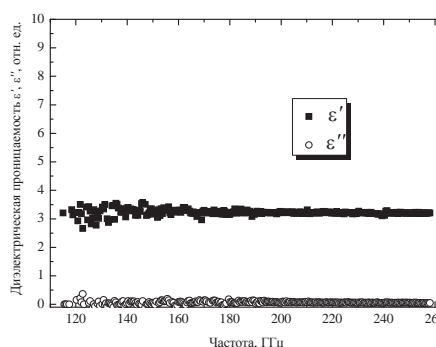
- проявление остаточной намагниченности выявляется только при введении наполнителя в количестве  $\geq 20$  об. %;
- увеличение времени обработки порошковой смеси с содержанием наполнителя  $\geq 20$  об. % от 0 до 60 мин значительно повышает величину остаточной намагниченности. С другой стороны видно, что при увеличении времени обработки свыше 60 мин данный параметр начинает снижаться.
- (рациональный) уровень остаточной намагниченности, являющийся приемлемым с точки

зрения сохранения физико-механических свойств покрытия, достигается при обработке порошковой смеси в течение 40–60 мин и введении наполнителя в количестве 20 об. %.

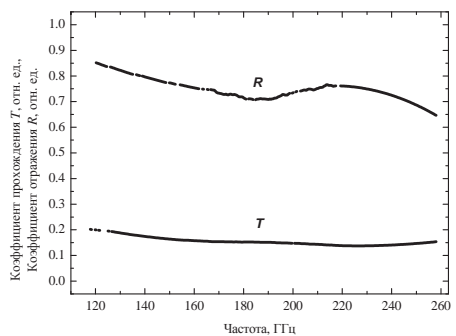
Известно, что введение наполнителя в порошковую краску должно снижать ее способность к однородному растеканию по поверхности подложки (пленкообразование); кроме того увеличение содержания функционального наполнителя уменьшает его смачиваемость краской. Для оценки данного эффекта проводили измерения шероховатости поверхности покрытия с помощью контактного профилометра (рис. 5, б). Прежде всего, следует отметить, что характер изменения шумов Баркгаузена (рис. 5, а) и шероховатости поверхности по-



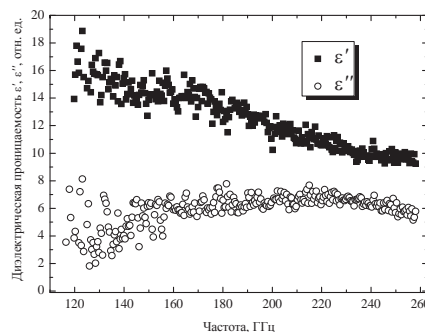
a/a



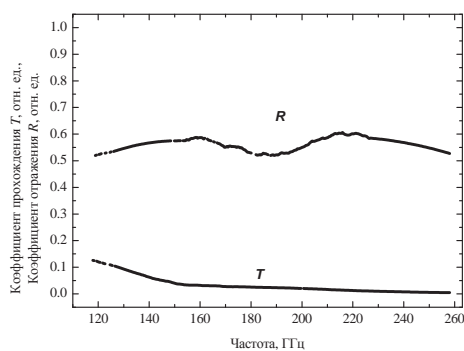
b/b



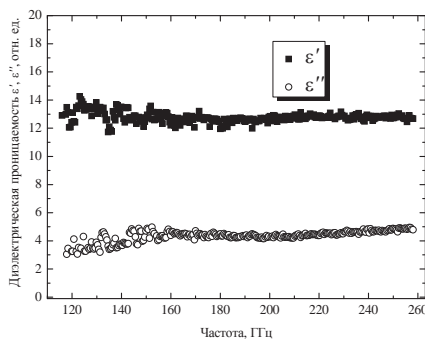
c/c



d/d



e/e



f/f

**Рис. 6.** Электромагнитный отклик (а, в, д) и диэлектрическая проницаемость (б, г, е) порошковой краски ОХТЭК-1 (образец № 1 в таблице – а, б); композита «ОХТЭК-1+ Х17Н2» (образец № 2 в таблице – в, г); композита «ОХТЭК-1+ Х17Н2» – 3 слоя (образец № 3 в таблице – д, е); а, в, д) коэффициенты отражения и прохождения; б, г, е) действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости

**Fig. 6.** Electromagnetic response (a, c, e) and dielectric conductivity (b, d, f) of powder paint (specimen no. 1 in Table – a, b); composite «Powder paint +Cr17Ni2» (specimen no. 2 in Table – c, d); composite «Powder paint +Cr17Ni2» – 3 layered (specimen no. 3 in Table – e, f); reflection and propagation coefficients (a, c, e); real and imagine components of dielectric conductivity (b, d, f)

крытия хорошо согласуются между собой. Это подтверждает тот факт, что чем более высокий уровень магнитных характеристик придается покрытию за счет повышения количества частиц наполнителя, тем худшей структурой оно должно обладать, а соответственно, и меньшими характеристиками адгезии (в том числе повышенной пористостью, что подтверждено данными растровой электронной микроскопии, рис. 4). Выявлено, что при введении 30 об. % уровень остаточной намагниченности становится выше и, казалось бы, следует использовать именно этот состав, а также время обработки, равное 60 мин. Однако данные покрытия имеют шероховатость  $Rz \sim 50$  мкм и обладают низкой адгезией (рис. 7, в), что является недопустимым с точки зрения эксплуатационных требований.

На рис. 6 приведены спектры коэффициентов отражения и прохождения и комплексных величин диэлектрической проницаемости трех образцов плоской формы, параметры которых приведены в таблице. Видно (рис. 6, а), что электромагнитное излучение практически полностью проходит через слой краски, частично отражаясь от гладкой поверхности за счет различия электромагнитных характеристик образца и окружающего пространства. Диэлектрическая проницаемость не имеет дисперсии в рассмотренной полосе частот, а величины действительной и мнимой составляющих соответствуют величинам аналогичных полимеров (рис. 6, б).

Добавление порошка нержавеющей стали существенно изменяет свойства материала, при этом 70–80 % падающей мощности отражается и частично поглощается в объеме образца (рис. 6, в). Спектры диэлектрической проницаемости указывают на наличие проводимости, которая может возникать при неравномерном распределении частиц стали в композите и образовании токовых каналов за счет контактов между проводящими частицами (рис. 6, г).

Увеличение толщины покрытия (формирование 3-х слоев) изменило характер поведения спектров диэлектрической проницаемости и снизило

величины и действительной, и мнимой составляющих (рис. 6, д, е). Это говорит о том, что частицы стали в большей степени разделены изолирующими прослойками, нежели в более тонком слое композита. Как следствие, уменьшился коэффициент отражения, и возросла поглощающая способность материала (рис. 6, д).

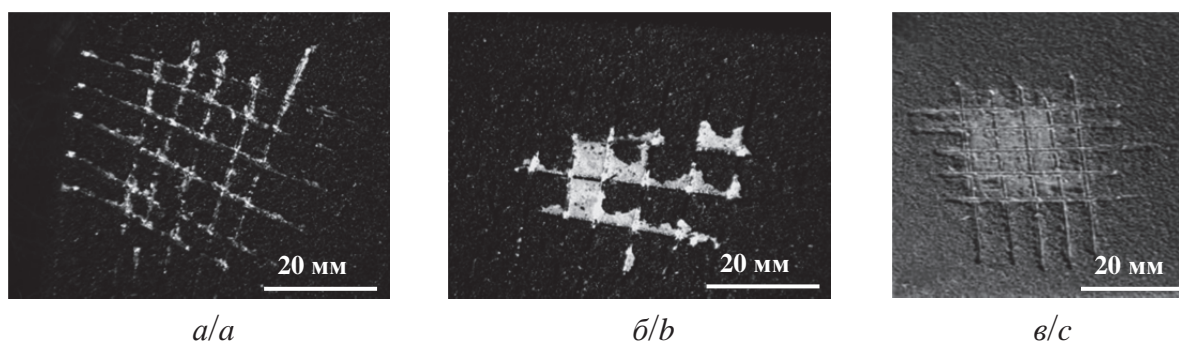
Таким образом, показано, что добавление порошка нержавеющей стали в порошковую краску изменило электрофизические характеристики покрытия, в частности его отражающие и пропускающие свойства. Показано, что покрытия из такого композиционного материала могут эффективно отражать и поглощать электромагнитное излучение терагерцевого излучения.

**Таблица.** Характеристики исследуемых покрытий

**Table.** Examined coating characteristics

Номер образца Specimen number	Состав покрытия Coating structure	Размер частиц наполнителя Filler particle size	Содержание наполнителя Filler content	Толщина покрытия, мм Coating thickness, mm
1	Краска (ПК) ОХТЭК-1 Paint (PP)	–	–	0,38
2	ПК+Х17Н2	< 71 мкм ( $\mu\text{m}$ )	20 об. % (vol. %)	0,13
3	ПК+Х17Н2 (3 слоя) (3 layers)			0,63

Адгезия покрытия с содержанием наполнителя до 20 об. % (включительно) до и после проведения климатических испытаний на образцах из магниевых сплавов соответствует 1 баллу (рис. 7, а). Проведенные климатические испытания покрытий, нанесенных из смеси, содержащей 20 об. % и обработанной в ПШМ в течение 40 мин, показали, что при соблюдении регламентированного режима напыления и толщине покрытия не менее 68 мкм признаков развития коррозии не наблюдалось. С другой стороны, дополнительно проведенные испытания магниевых образцов с покрытием, содержащим 30 об. % наполнителя по той же программе, показали наличие в них признаков коррозии.



**Рис. 7.** Оптическое изображение покрытия на образцах из магниевого сплава МА-20: а) 20 об. % + МО 40 мин; б) 30 об. % + МО 40 мин; в) 30 об. % + МО 60 мин

**Fig. 7.** Optical images of coatings on magnesium alloy MA-20 samples: а) 20 vol. % + MT 40 minutes; б) 30 vol. % + MT 40 minutes; в) 30 vol. % + MT 60 minutes

## Выводы

1. Предложен способ для приготовления смесей на основе полиэфирных порошковых красок и состав для напыления экранирующих покрытий на детали из магниевых сплавов. Он сочетает введение металлического наполнителя, обработку порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице и электростатическое напыление, что позволяет формировать защитные покрытия, обладающие требуемыми как физико-механическими, так и функциональными (экранирующими) свойствами. Разработанное покрытие и способ его получения могут быть использованы в прикладных задачах по созданию аппаратуры, применяемой на космических аппаратах для мониторинга и разведки георесурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов / И.С. Корнышева, Е.Ф. Волкова, Е.С. Гончаренко, И.Ю. Мухина // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 212–222.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 7–17.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 157–167.
4. Соколов А.Б. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 228 с.
5. Controllable electromagnetic response of onion-like carbon based materials / V.L. Kuznetsov, S.I. Moseenkov, A.V. Ishchenko, A.I. Romanenko, O.V. Anikeeva, T.I. Buryakov, S.A. Maksimenko, P.P. Kuzhir, D. Bychanok, A. Gusinski, O. Ruhavets, O. Shenderova, P. Lambin // *Phys. Stat. Sol.* – 2008. – V. 2. – P. 2051–2054.
6. Композиционный материал для поглощения электромагнитного излучения и способ его получения: пат. Рос. Федерация № 2242487; заявл. 26.06.03; опубл. 20.12.04, Бюл. № 35.
7. *Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media* / I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen. – London: ArtechHouse, 1994. – 291 p.
8. Композиционные материалы для защиты радиоэлектронного оборудования орбитальных спутников / Е.А. Джур, А.Ф. Санин, С.А. Божко, А.Ю. Андрианов // *Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: тезисы докладов 2-й Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «Глонасс»*. – Железногорск, 2012. – С. 348–350.
9. Радиопоглощающий материал: пат. Рос. Федерация № 2234775; заявл. 09.01.03; опубл. 20.08.04, Бюл. № 23.
10. Composite radio-absorbing material based on carbonyl iron for millimeter wavelength range / V.I. Suslyaev, V.A. Zhuravlev, O.A. Dotsenko, A.N. Babinovich // *Russian Physics Journal*. – 2008. – V. 8. – P. 874–876.
11. Electrophysical and electromagnetic properties of pure MWNTs and MWNT/PMMA composite materials depending on their structure / I.N. Mazov, V.L. Kuznetsov, S.I. Moseenkov,

2. Подобраны составы и режим совместной обработки в планетарной шаровой мельнице порошковой краски и порошка стали X17H2, обеспечивающие однородное распределение частиц в полимерной матрице, минимальную пористость, высокий уровень адгезии и сохранение защитных (противокоррозионных) свойств напыленных экранирующих покрытий.
3. Установлено, что добавление порошка нержавеющей стали в количестве 10–20 об. % существенно изменяет свойства материала, при этом ~ 70 % падающей мощности отражается и частично поглощается в объеме образца. Увеличение толщины покрытия от 0,13 до 0,63 мм приводит к уменьшению коэффициента отражения и возрастанию до 80 % поглощающей способности к излучению терагерцевого диапазона материала.

- A.V. Ishchenko, A.I. Romanenko, O.V. Anikeeva, T.I. Buryakov, V.I. Suslyaev // *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. – 2010. – V. 18. – P. 505–515.
12. Толмачева Д. Порошковые краски с металлическим эффектом. Особенности производства // *Промышленная окраска*. – 2011. – № 2. – С. 33–34.
13. Methods and compositions for ionizing radiation shielding: US Patent US 6455864 B1, Published on September 24, 2002.
14. Modelling Package Effects on Proton Irradiation Response of NMRC / A. Keating, A. Mohammadzadeh, P. Nieminen, B. Nickson, W. Hajdas, A. Jaksic // *RadFETs, RADECS 2003*. – Noordwijk, the Netherlands, September 15–19, 2003. – P. 457–465.
15. Omid Zeynali, Daryoush Masti, Saeed Gandomkar. Shielding protection of electronic circuits against radiation effects of space high energy particles // *Advances in Applied Science Research*. – 2012. – V. 3 (1). – P. 446–451.
16. Mechanical and Tribotechnical Characteristics of Nanocomposites Based on Mixture of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene and Polypropylene / S.V. Panin, L.A. Kornienko, M.A. Poltaranin, T. Mandoung, L.R. Ivanova // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 872. – P. 36–44. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.872.36.
17. Антистатические композиционные покрытия для защиты магниевых сплавов на основе порошковых красок, обработанных в планетарной шаровой мельнице / С.Ю. Языков, В.Х. Даммер, С.В. Панин, Б.Б. Овечкин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 105–113.
18. ГОСТ 25849–83. Порошки металлические. Метод определения формы частиц. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.
19. An investigation of electromagnetic response of composite polymer materials containing carbon nanostructures within the range of frequencies 10 MHz – 1,1 THz / V.I. Suslyaev, V.L. Kuznetsov, V.A. Zhuravlev, I.N. Mazov, E.Y. Korovin, S.I. Moseenkov, K.V. Dorozhkin // *Russian Physics Journal*. – 2013. – V. 8. – P. 970–976.
20. Composite radio-absorbing material based on carbonyl iron for millimeter wavelength range / V.I. Suslyaev, V.A. Zhuravlev, O.A. Dotsenko, A.N. Babinovich // *Russian Physics Journal*. – 2008. – V. 8. – P. 874–876.
21. Щибря Н.Г. и др. Антистатические декоративные покрытия на основе порошкового покрытия // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 1996. – № 12. – С. 19–20.
22. Влияние механической обработки на структуру и свойства порошка нестехиометрического карбида титана / М.В. Григорьев, Л.М. Молчунова, С.П. Буякова, С.Н. Кульков // *Известия вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 7/2. – С. 206–210.

Поступила 14.03.2015 г.

UDC 537.855

## APPLICATION OF PLANETARY BALL MILL FOR MANUFACTURING SHIELDING COMPOSITE COATINGS BASED ON POLYESTER POWDER PAINTS TO PROTECT MAGNESIUM ALLOYS

**Sergey V. Panin,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Institute of Strength Physics and Materials Sciences of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Sergey Yu. Yazykov,**

Scientific production center «Polyus», 56b, Kirov Avenue, Tomsk, 634041, Russia. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Vladislav Kh. Dammer,**

Scientific production center «Polyus», 56b, Kirov Avenue, Tomsk, 634041, Russia. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Boris B. Ovechkin,**

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

**Valentin I. Suslyaev,**

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: susl@mail.tsu.ru

**Kirill V. Dorozhkin,**

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: km007@sibmail.com

*The authors have studied the possibility of imparting shielding properties to the coating based on polyester powder paint by adding stainless steel powder and mechanical treatment of the powder mixture in a planetary ball mill to protect the magnesium alloys. Properties of the mixtures, structure and physical-mechanical characteristics of coatings were investigated at variation of the treatment time and the filler weight fraction. The ultimate goal of the studies was to optimize the structure and properties of the coatings while keeping their physical and mechanical properties at initial level as well as by providing them with a new functional grade – shielding of electromagnetic radiation (EM-radiation). The mechanical treatment was performed in a planetary ball mill MF 4/0,5 at the total rotation speed of steel bawls of 800 rev/min. Filler particles and powder paint were put in the required amounts into the planetary mill where they were jointly mechanically treated for 20...80 min with a time step of 10 min. The effect of the mechanical treatment time on powder mixture properties were evaluated by measurement of the bulk density. As a result of complex tests simulating various atmospheric and mechanical impacts, it was found that the designed coating with a filler content of 12,5 wt. % and time of the powder mixture treatment in a planetary mill of 40 minutes ensures the formation of the coating film with the thickness of 70 μm possessing the required functional and protective characteristics. Thus, the suggested technique for coating formation on products made of magnesium alloys, which consist of: adding shielding filler, treatment of the powder mixture in a planetary ball mill and electrostatic spraying, can be used to protect spacecraft electronics to operate in the open space. The results of the researches carried out can be used in the applied tasks of geo-technologies when designing the equipment, used at space vehicles for monitoring and exploring mineral sources.*

### Key words:

*Georesource monitoring, powder coating, stainless steel powder, electromagnetic wave shielding, planetary ball mill, protective coating.*

### REFERENCES

1. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Mukhina I.Yu. Perspektivy primeneniya magnievykh i liteynykh alyuminiyevykh splavov [Prospects of application of magnesium and aluminum casting alloys]. *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 212–222.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of developing materials and technologies of their processing up to 2030]. *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 7–17.
3. Antipov V.V. Strategiya razvitiya titanovykh, magnievykh, berillievykh i alyuminiyevykh splavov [The strategy of developing titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys]. *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 212–222.

- logii) [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 157–167.
4. Sokolov A.B. *Obespechenie stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektrostaticheskikh razryadov*. Dis. Dokt. nauk [Ensuring stability onboard avionics spacecraft to electrostatic discharges. Dr. Diss.]. Moscow, 2009. 228 p.
  5. Kuznetsov V.L., Moseenkov S.I., Ishchenko A.V., Romanenko A.I., Anikeeva O.V., Buryakov T.I., Maksimenko S.A., Kuzhir P.P., Bychanok D., Gusinski A., Ruhavets O., Shenderova O., Lambin P. Controllable electromagnetic response of onion-like carbon based materials. *Phys. Stat. Sol.*, 2008, vol. 2, pp. 2051–2054.
  6. Gorshenev V.N., Bibikov S.B., Kulikovskii E.I., Novikov Y.N. *Kompozitsionny material dlya pogloshcheniya elektromagnitnogo izlucheniya i sposob ego polucheniya* [A composite material for absorbing electromagnetic radiation and a method of producing]. Patent RF, no. 2242487, 2004.
  7. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. *Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media*. London, Artech House, 1994. 291 p.
  8. Dzhur E.A., Sanin A.F., Bozhko S.A., Andrianov A.Yu. *Kompozitsionnye materialy dlya zashchity radioelektronnogo oborudovaniya orbitalnykh sputnikov* [Composite materials for protecting electronic equipment orbiting satellites]. *Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka: tezisy dokladov 2-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 30 letiyu zapuska na orbitu pervogo navigatsionnogo kosmicheskogo apparata «Glonass»* [Navigation satellite systems, their role and importance in the life of a modern man: abstracts of the 2<sup>nd</sup> International scientific and technical conference dedicated to the 30<sup>th</sup> anniversary of the launch into orbit of the first navigation spacecraft «Glonass»). Zheleznogorsk, 2012. pp. 348–350.
  9. Lepeshkin B.B., Belyaev A.A., Gudkov O.I., Grechikhina M.V., Puzanov O.E., Chursova L.V., Ivanova N.N. *Radiopogloshchayushchy material* [Radar-absorbing material]. Patent RF, no. 2234775, 2004.
  10. Suslyayev V.I., Zhuravlev V.A., Dotsenko O.A., Babinovich A.N. Composite radio-absorbing material based on carbonyl iron for millimeter wavelength range. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 8, pp. 874–876.
  11. Mazov I.N., Kuznetsov V.L., Moseenkov S.I., Ishchenko A.V., Romanenko A.I., Anikeeva O.V., Buryakov T.I., Suslyayev V.I. Electrophysical and electromagnetic properties of pure MWNTs and MWNT/PMMA composite materials depending on their structure. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2010, vol. 18, pp. 505–515.
  12. Tolmacheva D. Poroshkovye kraski s metallicheskim efektom. Osobennosti proizvodstva [Powder coatings with metallic effect. Features of production]. *Promyshlennaya okraska – Industrial painting*, 2011, no. 2, pp. 33–34.
  13. Featherby M., Strobel D.J., Layton Ph.J., Li E. *Methods and compositions for ionizing radiation shielding*. US Patent US 6455864 B1, Published on September 24, 2002.
  14. Keating A., Mohammadzadeh A., Nieminen P., Nickson B., Hajdas W., Jaksic A. Modelling Package Effects on Proton Irradiation Response of NMRC. *RadFETs, RADECS 2003*. Noordwijk, the Netherlands, September 15–19, 2003. pp. 457–465.
  15. Omid Zeynali, DaryoushMasti and Saeed Gandomkar. Shielding protection of electronic circuits against radiation effects of space high energy particles. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 446–451.
  16. Panin S.V., Kornienko L.A., Poltaranin M.A., Mandoung T., Ivanova L.R. Mechanical and Tribotechnical Characteristics of Nanocomposites Based on Mixture of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene and Polypropylene. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 872, pp. 36–44. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.872.36.
  17. Zazykov S.Yu., Dummer V.H., Panin S.V., Ovechkin B.B. Antistaticheskie kompozitsionnye pokrytiya dlya zashchity magnievyykh syplavov na osnove poroshkovyykh kyrasok, obrabotannykh v planetarnoy sharovoy melnitse [Antistatic composite coatings for protecting magnesium alloys based on powder paints processed in a planetary ball mill]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 105–113.
  18. GOST 25849–83. *Poroshki metallicheskie. Metod opredeleniya formy chastits* [State Standard 25849–83. Metal powders. Method of determining the shape of the particles]. Moscow, Standartinform Publ., 1983. 7 p.
  19. Suslyayev V.I., Kuznetsov V.L., Zhuravlev V.A., Mazov I.N., Korovin E.Y., Moseenkov S.I., Dorozhkin K.V. An investigation of electromagnetic response of composite polymer materials containing carbon nanostructures within the range of frequencies 10 MHz – 1.1 THz. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 8, pp. 970–976.
  20. Suslyayev V.I., Zhuravlev V.A., Dotsenko O.A., Babinovich A.N. Composite radio-absorbing material based on carbonyl iron for millimeter wavelength range. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 8, pp. 874–876.
  21. Shchibrya N.G. Antistaticheskie dekorativnye pokrytiya na osnove poroshkovogo pokrytiya [Antistatic decorative coatings based on powder coating]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye – Paint materials and their application*, 1996, no. 12, pp. 19–20.
  22. Grigoriev M.V., Molchunova L.M., Buyakova S.P., Kulkov S.N. Vliyanie mekhanicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva poroshka nestekhiometricheskogo karbida titana [Effect of mechanical treatment on manner, structure and properties of nonstoichiometric titanium carbide powder]. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7/2, pp. 206–210.

Received: 14 March 2015.

УДК 519.171.1

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА СТРУКТУР ГРАФОВ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЧНОГО ИЗОМОРФИЗМА В ЗАДАЧАХ ГЕОИНФОРМАТИКИ

**Погребной Андрей Владимирович,**аспирант кафедры информатики и проектирования систем  
Института кибернетики Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: avpogrebnoy@gmail.com

Актуальность работы обусловлена тем, что исследования по проблемам сходства структур ограничиваются применением косвенных признаков оценивания сходства. Необходимы эффективные алгоритмы определения сходства структур графов на основе прямых признаков в категориях изоморфизма. Такие алгоритмы могут применяться, например, для сжатия данных при работе геоинформационных систем и систем экологического мониторинга с векторными картами, для распознавания образов и в других приложениях. Исследования по применению прямых признаков для оценивания сходства на основе совмещения сравниваемых графов и выделения в них общих частей в виде изоморфных подграфов, названных частичными изоморфизмами, практически отсутствуют. Считается, что задача определения частичного изоморфизма без полного перебора подстановок сходства не может быть решена. Поэтому актуальными являются исследования по поиску приемлемых решений данной задачи при ограниченном переборе подстановок сходства.

**Цель исследования** заключается в разработке метода определения сходства структур графов путём выделения в них наибольшей общей части, т. е. наибольшего частичного изоморфизма.

**Методы исследования** основаны на применении прикладной теории графов, теории оптимизации и разработки алгоритмов, моделирования структуры графов сетью автоматов с целью дифференциации вершин.

**Результаты.** Введены основные понятия и сформулированы положения концепции оценивания сходства структур графов на основе совмещения вершин и выделения общих подграфов – частичных изоморфизмов. Для сокращения переборов при решении проблемы определения наибольшего частичного изоморфизма предложено использовать идеи метода дифференциации вершин с помощью моделирования структур графов на основе сетей автоматов. Разработан метод взаимозависимой дифференциации вершин в сравниваемых графах, который позволяет формировать подстановку сходства и соответствующий частичный изоморфизм, а также алгоритм поиска подстановок сходства, локализованных относительно определенных пар вершин, и алгоритм выделения подстановки с наибольшим частичным изоморфизмом. Работа алгоритма поиска подстановки сходства на основе взаимозависимой дифференциации вершин показана на примере определения сходства двух графов.

### **Ключевые слова:**

Сходство структур графов, частичный изоморфизм, подстановка сходства, дифференциация вершин, однородные группы вершин.

### **Введение**

Задачи исследования свойств объектов на основе анализа их структурных характеристик составляют одно из наиболее важных и перспективных направлений развития прикладной теории графов. Графовыми моделями представляются структуры объектов самой разной природы. Это могут быть сетевые структуры энергосистем, нефтепроводов, газопроводов, систем транспорта [1–4], экологического мониторинга [5], геоинформационных систем [6], структур баз данных и программных систем [7, 8], систем распознавания образов [9], систем связи, компьютерных сетей [10], радиоэлектронных схем [11] и многих других объектов. Опережающее развитие в этих исследованиях получило моделирование зависимостей «структура–свойство», особенно для молекулярных структур в химии и биологии [12, 13]. Здесь широко используются молекулярные дескрипторы, представляющие инварианты молекулярного графа химического соединения [14].

Среди перечисленных объектов выделяются геоинформационные системы и системы экологического мониторинга, функционирование которых сопровождается большими объемами обработки и передачи данных. Покажем на этих примерах возможность применения методов анализа структур

данных и, в частности, задачи оценивания сходства структур для сжатия данных и снижения времени передачи. С этой целью пространственная модель геоинформации в виде векторной карты представляется графовой моделью, где вершинами являются элементы векторной карты, а рёбра соответствуют топологическим отношениям между ними.

Графовая модель векторной карты разбивается на части, например квадраты. После попарного оценивания сходства графовых моделей каждого квадрата на основе полученных оценок сходства квадраты группируются в кластеры. В каждом кластере выделяется эталонная графовая модель, имеющая наибольшее сходство с другими объектами в кластере. В этом случае при передаче данных полностью передаются только эталоны кластеров, а для остальных квадратов – их отличия от эталона. Если, например, векторная карта разбита на 100 квадратов и сформировано 10 кластеров со средним сходством 80 %, то объём передаваемых данных сокращается примерно в три раза.

В пространственно-временных системах, построенных на основе сенсорных сетей, сбор данных и отображение на векторную карту осуществляется с датчиков сети. Такие системы применяются, например, для наблюдения за лесными пожарами, нефтяными пятнами, гидрологическими объектами



ми. В этом случае тематическая информация, представленная на векторной карте, также может быть преобразована в графовую модель. Оценивая сходство структур графовых моделей через определенные промежутки времени, можно наблюдать и оценивать динамику изменений анализируемых явлений.

В комплексе исследований по решению задач в приведенных примерах систем предлагаемая статья содержит исследования для разработки метода решения задачи оценивания сходства структур обыкновенных графов. Для графовых моделей, где вершинам и ребрам приписываются атрибуты, которые отражают, в частности, тематические особенности элементов векторной карты и их отношений, решение задачи оценивания сходства упрощается. Наличие эффективных алгоритмов оценивания сходства структур графовых моделей является основой для успешного решения задач сжатия данных и, соответственно, снижения времени передачи в системах, работающих с векторными картами.

В составе математических инструментов, разрабатываемых для анализа структурных свойств объектов и установления зависимостей «структура–свойство», методы оценивания сходства структур также занимают важное место. Среди задач анализа структур графов проблема определения сходства в виде количественной меры изоморфизма является наиболее сложной. В практических приложениях часто оказывается важнее оценить сходство структур, чем получить однозначный ответ по результатам проверки на изоморфизм, т. е. установить наличие или отсутствие полного сходства. Сюда же относится получение инвариантного описателя структуры и вычисление для него полного инварианта, по которым легко устанавливается изоморфизм графов.

Теперь уже можно констатировать, что проблема получения инвариантного описателя структуры, вычисления полного инварианта и проверки на изоморфизм успешно решена [15, 16]. Что касается сходства структур, оцениваемого частичным изоморфизмом, то заметных продвижений в решении этой проблемы не происходит. Основные исследования по проблемам сходства сосредоточены на разработке методов опосредованного оценивания сходства структур на основе сопоставления инвариантов, различных дескрипторов [17–19].

Это направление исследований получило большое развитие и практическое применение в компьютерной химии [20–23].

Известные подходы к определению сходства структур ограничиваются сравнением косвенных признаков и не рассматривают возможности применения прямых признаков, связанных с изоморфизмом. В данной статье проблема определения сходства рассматривается как выделение в сравниваемых графах  $G$  и  $H$  максимальной общей части – графа  $Q$ . Для решения проблемы в такой формулировке необходимо перебрать все возможные подстановки вершин графов  $G$  и  $H$  и в каждой из них определить число совместившихся ребер, образующих общую часть. Подстановку с наибольшим числом ребер  $m_Q$  в общей части  $Q$ , по аналогии с подстановкой изоморфизма, будем именовать подстановкой сходства. Если графы  $G$  и  $H$  изоморфны, то для них подстановки сходства будут совпадать с подстановками изоморфизма.

Подстановка сходства с числом ребер  $m_Q$  в общей части  $Q$ , в отличие от опосредованного оценивания с косвенными оценками сходства, оценивает сходство структур графов  $G$  и  $H$  в явном виде. На рис. 1 приведен пример графов  $G$  и  $H$  и подстановка сходства, порождающая общую часть в виде графа  $Q$ .

Общая часть в виде графа  $Q$  в графах  $G$  и  $H$  выделена жирными ребрами. Справа на рис. 1 показан граф  $Q$ , вершины которого соответствуют парам номеров из подстановки сходства. Первый номер в парах подстановки указывает вершину из графа  $G$ , а второй – из графа  $H$ .

Говорить о преимуществах косвенной или явной оценок сходства нет оснований, т. к. предпочтения по их применению определяются целями анализа сходства структур. Отметим лишь, что проблема вычисления явной оценки сходства структур является сложной и относится к нерешаемым задачам. Метод выделения частичного подграфа в сравниваемых графах, предложенный в работе [24], имеет ограниченные возможности и способен сравнивать графы только с равными степенными инвариантами. Ниже предлагаются результаты исследований, направленные на разработку метода вычисления явной оценки сходства графов, которые могут содержать равные и неравные числа вершин и ребер.

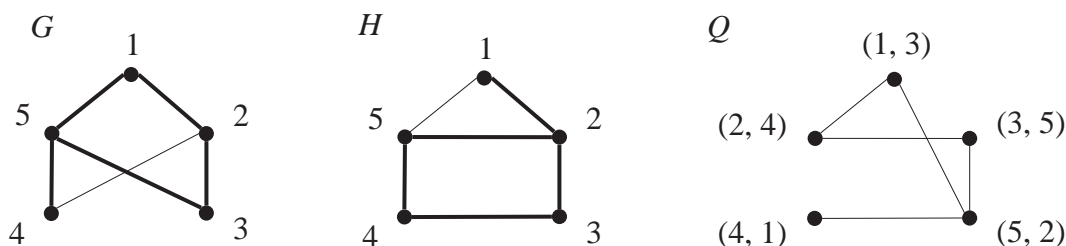


Рис. 1. Пример подстановки сходства

Fig. 1. Example of the similarity substitution

### Подстановки сходства и их оценивание

Проблему сходства будем рассматривать для двух обыкновенных графов:  $G=(E_G, U_G)$ ,  $E_G=\{e_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,n_G$ ,  $U_G=\{(e_{i_1}, e_{i_2})\}$ ,  $i_1 \neq i_2$ ,  $|U_G|=m_G$  и  $H=(E_H, U_H)$ ,  $E_H=\{e_j\}$ ,  $j=1,2,\dots,n_H$ ,  $U_H=\{(e_{j_1}, e_{j_2})\}$ ,  $j_1 \neq j_2$ ,  $|U_H|=m_H$ . Будем также считать, что для сравниваемых графов  $G$  и  $H$  соблюдается условие  $n_G \leq n_H$ . На соотношения величин  $m_G$  и  $m_H$  ограничения не накладываются. Предполагается, что графы  $G$  и  $H$  являются связными. При этом граф  $Q$ , сформированный для подстановки сходства, может быть как связным, так и несвязным. Принимается также, что  $n_Q=n_G$ , т. е. граф  $Q$  общей части может содержать одну или несколько компонент связности, в том числе и изолированные вершины.

Решение задачи определения сходства графов  $G$  и  $H$  заключается в формировании всех подстановок сходства и выбора среди них такой подстановки, которая соответствует общей части  $Q$  с наибольшим значением  $m_Q$ . Число перебираемых подстановок сходства при  $n_G=n_H$  составляет  $n_G!$ , а при  $n_G < n_H$  увеличивается на число сочетаний из  $n_H$  по  $n_G$ . Для графов, содержащих более 15–20 вершин, выполнить такие переборы уже невозможно. Поэтому основные исследования при разработке метода будут направлены на сокращение перебираемых подстановок.

Величина  $m_Q$ , равная числу рёбер в общей части  $Q$ , применима при сравнении подстановок сходства. Для оценивания сходства графов  $G$  и  $H$  нужна другая оценка, учитывающая параметры сравниваемых графов. Если графы  $G$  и  $H$  имеют равные степенные инварианты, т. е.  $n_G=n_H$  и  $m_G=m_H$ , то оценку сходства  $\mu(G, H)$  можно определить отношением  $m_Q/m_G$  [24]. В нашем случае, когда на параметры  $n_G$ ,  $n_H$  и  $m_G$ ,  $m_H$  не накладывается требование равенства, в качестве оценки сходства  $\tilde{\mu}(G, H)$  предлагается следующее отношение:

$$\tilde{\mu}(G, H) = (m_Q / n_Q) / \max(m_G / n_G, m_H / n_H). \quad (1)$$

Величины  $m_G/n_G$  и  $m_H/n_H$  в выражении (1) определяют средние значения степеней вершин в графах  $G$  и  $H$ . Учитывая, что  $n_Q=n_G$ , величина  $m_Q/m_G$  также равна среднему значению степеней вершин графа  $Q$ . Очевидно, что эта величина не может превысить значение  $m_G/n_G$ , в то время как значение  $m_H/n_H$  может быть превышено.

Такая ситуация вполне допустима, если  $(m_G/n_G) > (m_H/n_H)$  и при этом на множестве вершин  $E_Q \subset E_H$ , заданном подстановкой сходства, расположен подграф  $G_{H_Q}$  с числом рёбер  $m_{H_Q} \geq m_Q$ . В этом случае, согласно (1), мы можем получить  $\tilde{\mu}(G, H) = 1$ . Таким образом, при  $(m_G/n_G) > (m_H/n_H)$  возможно  $(m_Q/n_Q) > (m_H/n_H)$ , что противоречит понятию оценки сходства как доли совпадения графов. Данное противоречие устраняется, если в выражении (1) величину  $m_H/n_H$  заменить на  $m_{H_Q}/n_G$ . Тогда (1) запишется в следующем виде:

$$\mu(G, H) = m_Q / \max(m_G, m_{H_Q}). \quad (2)$$

Заметим, что в выражении (2) граф  $H$  представлен только подграфом  $G_{H_Q}$ . Согласно (2)  $\mu(G, H) = 1$ , если  $m_Q = m_G = m_{H_Q}$ .

При оценивании сходства могут учитываться и другие факторы. Например, если при  $n_H > n_G$  в графе  $H$  удаётся выделить несколько подстановок сходства с наибольшими значениями  $m_Q$ , то это может расцениваться как увеличение сходства. Учёт подобных факторов при оценивании сходства не вызывает больших трудностей и может осуществляться исходя из целей анализа сходства в конкретных приложениях. Таким образом, для оценивания сходства структур графов на основе подстановок сходства могут использоваться различные оценки явного типа. При разработке методов анализа сходства на основе таких оценок важно научиться ограничивать перебор при выделении подстановок сходства.

### Основные положения метода выделения частичного изоморфизма

Сравнивая протекание процессов свободной и зависимой дифференциации вершин структур графов  $G$  и  $H$  с равными степенными инвариантами [16], легко установить наличие или отсутствие полного сходства структур графов. При полном сходстве графов  $G$  и  $H$  достигается полная дифференциация вершин и формируется подстановка изоморфизма. Несовпадение процессов дифференциации на любом шаге интеграции кодов структурных различий означает отсутствие полного сходства структур. В этом случае дифференциация вершин достигает некоторого состояния, по которому косвенно можно судить об уровне сходства структур сравниваемых графов.

В предлагаемом исследовании нас интересует не косвенное, а прямое оценивание сходства структур в категориях частичного изоморфизма, когда в графах  $G$  и  $H$  процесс дифференциации вершин следует подчинить поиску подстановки сходства, доставляющей наибольший частичный изоморфизм этих графов.

Введение понятия частичного изоморфизма для графов с равными степенными инвариантами является вполне естественным и отражает ситуацию, когда подстановка изоморфизма отсутствует. В этом случае подстановку с наибольшим числом совмещенных рёбер будем именовать подстановкой сходства. Такая подстановка определяет частичный изоморфизм графов  $G$  и  $H$ , которому соответствует общая часть  $Q$  с наибольшим числом рёбер  $m_Q$ .

Для графов  $G$  и  $H$  с неравными степенными инвариантами частичный изоморфизм будем определять относительно подграфа  $G_{H_Q}$ , выделяемого в графе  $H$  подстановкой сходства с общей частью  $Q$ . Любая подстановка вершин в сравниваемых графах  $G$  и  $H$  соответствует некоторой общей части  $Q$ , содержащей  $m_Q$  рёбер. Здесь, как и в случае равных степенных инвариантов, частичный изомор-

физм соответствует подстановке сходства с наибольшей общей частью. В случае, если общая часть  $Q$  включает все рёбра графа  $G$ , то имеет место изоморфное вложение графа  $G$  в граф  $H$  [7]. Согласно выражению (2) для данного случая оценка сходства  $\mu(G, H) = 1$ .

Задача определения частичного изоморфизма графов  $G$  и  $H$  со степенными инвариантами  $S(G) \neq S(H)$  требует перебора и анализа  $C_{n_H}^{n_G} \times n_G!$  подстановок. При определении изоморфизма проблеме переборов удалось решить на основе метода дифференциации вершин, в котором модель структуры графа представляется сетью автоматов [16]. Функционирование такой динамической системы в дискретном времени позволило улавливать разнообразие отношений между структурными различиями и на этой основе дифференцировать вершины структуры. Поэтому в предлагаемом методе оценивания сходства структур графов основные надежды на сокращение переборов также связываются с применением процессов дифференциации вершин.

Подстановка сходства и подстановка изоморфизма имеют принципиальные отличия. Главное отличие заключается в том, что в подстановке сходства допускается любая пара вершин из множества  $E_G \times E_H$ , а в подстановке изоморфизма, например, пары вершин с разными степенями недопустимы.

Для пар вершин в подстановке сходства не существует характеристик, равенство которых воспринималось бы как необходимое условие частичного изоморфизма. Это говорит о том, что никакие базовые (вычисляемые), скрытые и виртуальные структурные различия [16] не могут непосредственно применяться в процессе дифференциации вершин при поиске подстановки сходства и соответствующего частичного изоморфизма в виде графа  $Q$ .

Таким образом, можно констатировать, что главным препятствием для применения метода дифференциации вершин является отсутствие базового структурного различия для формирования начальной дифференциации. Совпадение таких структурных различий у вершин в парах подстановки сходства должно было бы восприниматься как необходимое условие частичного изоморфизма.

Метод дифференциации на основе сети автоматов сталкивается с аналогичной ситуацией при определении изоморфизма для однородных и симметричных графов. Начальная дифференциация в этом случае выполнялась путём введения виртуального различия. Этим же правилом предлагается воспользоваться при определении частичного изоморфизма. При этом сравниваемые графы  $G$  и  $H$  должны рассматриваться как однородные, т. к. в подстановках сходства допускаются любые пары вершин из этих графов.

*Первое положение* метода отражает необходимость искусственно принимать графы  $G$  и  $H$  однородными и вводить виртуальные различия для по-

лучения начальной дифференциации. Данное положение является принципиально важным и во многом определяет сущность предлагаемого метода дифференциации вершин при поиске частичного изоморфизма. В соответствии с данным положением процесс дифференциации вершин в графах происходит на основе скрытых различий, обнаруживаемых при функционировании модели структуры в виде сети автоматов. Скрытые различия в данном случае порождаются разнообразием отношений между виртуальными различиями в соответствии со структурой графа.

*Второе положение* связывается с устранением несовпадений, возникающих при сравнении процессов дифференциации вершин в графах  $G$  и  $H$ . Сравнение процессов дифференциации производится на уровне однородных групп, которые в графах  $G$  и  $H$  на каждом шаге интеграции кодов структурных различий должны совпадать. Это достигается «удалением» несовмещающихся рёбер. При сравнении однородных групп необходимо выбрать минимальное число рёбер, удаление которых приводит к совпадению групп. Дифференциация вершин с взаимно согласованным в графах  $G$  и  $H$  удалением рёбер названа взаимозависимой. Результатом взаимозависимой дифференциации является получение инвариантного описателя общей части в виде графа  $Q$ . На основе инвариантного описателя формируется подстановка сходства частичного изоморфизма и при необходимости полный инвариант  $P(Q)$  графа  $Q$ .

*Третье положение* также направлено на устранение несовпадений при сравнении однородных групп вершин в графах  $G$  и  $H$ . Согласно этому положению некоторые вершины с разными кодами структурных различий искусственно принимаются равными, т. е. различие таких вершин маскируется. Правило выполнения данной операции названо правилом маскирования. Чаще всего правило маскирования применяется в ситуациях, когда в некотором  $k$ -м состоянии моделей структур принять однозначное решение по продолжению процесса дифференциации не удаётся. После применения данного правила и выполнения одного или нескольких шагов дифференциации появляется дополнительная информация для принятия однозначного решения. Это позволяет вернуться в  $k$ -е состояние и принять решение. Алгоритм принятия решения в данном случае можно сравнить с действиями шахматиста, который перед тем как сделать очередной ход, просчитывает несколько ходов вперёд.

*Четвёртое положение* устанавливает основные правила организации поиска подстановки сходства  $Z_{GH}$  с наибольшей общей частью  $Q$ . При определении изоморфизма для однородных графов  $G$  и  $H$  с помощью алгоритма свободной (ISD-F) и зависимой (ISD-D) интеграции кодов структурных различий [15, 16] виртуальное различие в графе  $G$  вводится для одной (любой) вершины, а в графе  $H$  – последовательно всем вершинам. Процесс диффе-

ренициации в графе  $G$  с помощью алгоритма ISD-F выступает в роли эталона при выполнении дифференциации в графе  $H$  с помощью алгоритма ISD-D.

Аналогично при определении частичного изоморфизма с помощью алгоритма взаимозависимой (ISD-ID) интеграции кодов структурных различий о достигнутом уровне сходства будем судить по процессу дифференциации в графе  $G$ . Величиной  $m_G^k$  обозначим число рёбер, удаленных в графе  $G$  на шагах  $1, 2, \dots, k$  интеграции. Чем меньше значение  $m_G^k$ , тем выше уровень сходства.

В процессе взаимозависимой дифференциации вершин в графах  $G$  и  $H$  текущее значение  $m_G^k$  будем сравнивать с достигнутым ранее минимальным значением  $m_G^*$ . Если  $m_G^k \geq m_G^*$ , то продолжать процесс дифференциации не имеет смысла. Здесь величина  $m_G^*$  является нижней границей достигнутого ранее уровня сходства при поиске подстановки сходства по схеме метода ветвей и границ.

Использование условия  $m_G^k \geq m_G^*$  для прерывания процесса дифференциации позволяет существенно сократить объем вычислений при поиске подстановки сходства. Процесс взаимозависимой дифференциации запускается  $n_H$  раз после введения виртуального различия для каждой вершины графа  $H$ . Поэтому для сокращения вычислений важно получать минимальные значения  $m_G^*$  уже на первых запусках. На рис. 2 показана схема последовательного введения виртуальных различий для запуска процессов дифференциации при поиске подстановки сходства  $Z_{GH}$  в графах  $G$  и  $H$ , содержащих 5 и 6 вершин.

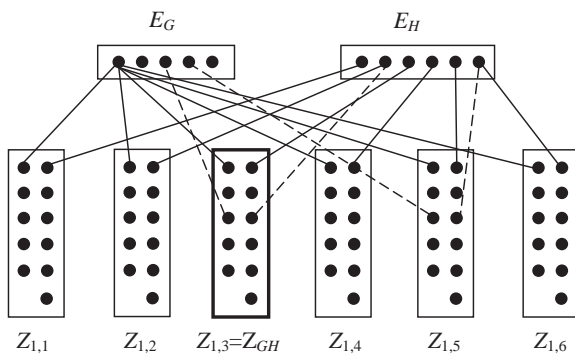


Рис. 2. Схема запуска процессов дифференциации

Fig. 2. Scheme of the differentiation processes startup

В каждой подстановке  $Z_{ij}$  одна пара вершин  $(e_i, e_j)$  задаётся при введении виртуальных различий. На рис. 2 эти пары связаны с множествами  $E_G$  и  $E_H$  сплошными линиями. Остальные пары в подстановках определяются в ходе взаимозависимой дифференциации. Примеры таких пар показаны пунктирными линиями. Подстановка  $Z_{1,3} = Z_{GH}$ , выделенная жирными линиями, соответствует подстановке сходства с минимальным значением  $m_G^*$ .

Подводя итог обсуждения основных положений метода оценивания сходства структур, отметим, что они сформулированы исходя из полного отрицания возможного существования вычисля-

емых структурных различий вершин графов для определения частичного изоморфизма. Поэтому введение виртуального различия в данном случае не следует рассматривать как аналог некоторой вычисляемой характеристики, равной для пары вершин в сравниваемых графах. Здесь правильнее говорить о наделении этих вершин безусловным правом присутствовать в подстановке сходства  $Z_{ij}$  в качестве пары. Такие пары вершин:  $(e_i, e_j)$ ,  $e_i \in E_G$ ,  $e_j \in E_H$ , показаны на рис. 2. Они задают начальную дифференциацию вершин в графах  $G$  и  $H$ . При этом в ходе поиска подстановки сходства  $Z_{GH}$  все вершины  $e_j \in E_H$  в паре с вершиной  $e_i \in E_G$  будут последовательно наделяться таким правом. Все остальные пары вершин в подстановках сходства будут определяться в процессе взаимозависимой дифференциации на основе выделения скрытых структурных различий в отношениях между вершинами.

### Алгоритм вычисления подстановки сходства $Z_{ij}$

Поиск подстановки сходства  $Z_{ij}$  выполняется для двух графов  $G$  и  $H$ , при условии, что в каждом из них выделено по одной вершине  $e_i \in E_G$  и  $e_j \in E_H$ , которым присвоены равные коды виртуальных различий, т. е. пара вершин  $(e_i, e_j)$  заведомо вводится в  $Z_{ij}$ . Графы  $G$  и  $H$  представлены списками инциденторов  $\{e_i(F(e_i))\}$  и  $\{e_j(F(e_j))\}$ . При этом предполагается, что  $n_G \leq n_H$ , а соотношение между величинами  $m_G$  и  $m_H$  не устанавливается.

Алгоритм поиска  $Z_{ij}$  входит в состав общего алгоритма определения частичного изоморфизма с получением подстановки сходства  $Z_{GH}$ . Общий алгоритм осуществляет выбор  $Z_{GH}$  из  $n_H$  подстановок  $Z_{ij}$ , согласно четвертому положению метода, и будет изложен в следующем разделе. Подстановка  $Z_{ij}$ , в отличие от  $Z_{GH}$ , выделяется относительно одной из вершин  $e_j$  графа  $H$  и вершины  $e_i$  графа  $G$ . При поиске подстановки  $Z_{GH}$  для выбранной в графе  $G$  вершины  $e_i$  просматриваются все вершины  $e_j$  в графе  $H$ .

Напомним также, что подстановка  $Z_{ij}$  должна соответствовать графу  $Q$  с наибольшим числом рёбер  $m_Q$  или минимальному числу рёбер  $m_G^*$ , удаленных из графа  $G$  в процессе взаимозависимой дифференциации вершин в графах  $G$  и  $H$ . Поэтому при поиске  $Z_{ij}$ , так же как и  $Z_{GH}$ , будет применяться четвертое правило, исключающее продолжение поиска заведомо неперспективного варианта.

Функциональная схема алгоритма поиска подстановки сходства  $Z_{ij}$  приведена на рис. 3.

В блоке 1 по заданным вершинам  $e_i \in E_G$  и  $e_j \in E_H$  формируется начальная дифференциация вершин в виде векторов  $D^0(G) = \{d_i^0\}$  и  $D^0(H) = \{d_j^0\}$ . Вершине  $e_i$  в векторе  $D^0(G)$  и вершине  $e_j$  в векторе  $D^0(H)$  присваивается код виртуального различия  $d_i^0 = 2$  и  $d_j^0 = 2$ . Остальные позиции в векторах  $D^0(G)$  и  $D^0(H)$  получают коды  $d_i^0 = d_j^0 = 1$ . Значения  $d_i^0$  и  $d_j^0$  в векторах  $D^0(G)$ ,  $D^0(H)$  принимаются в качестве состояний автоматов соответствующих вершин.

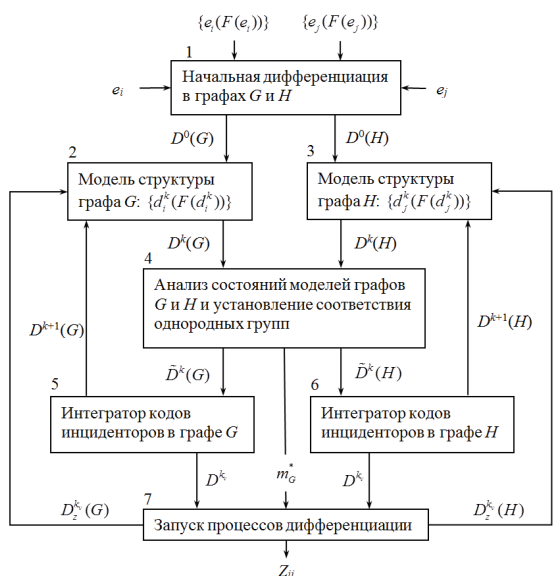
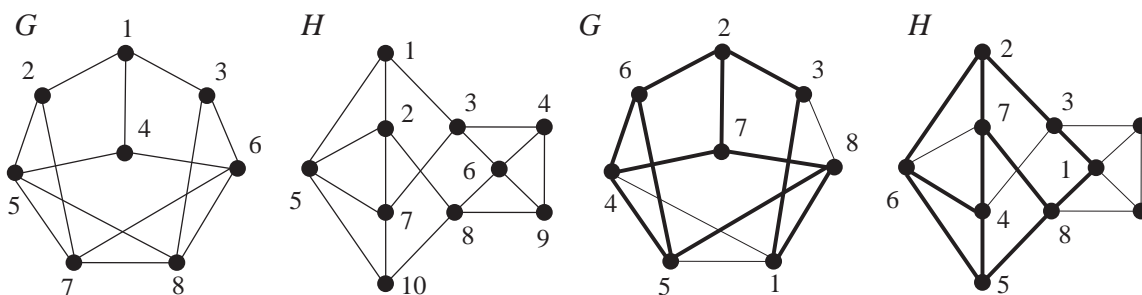


Рис. 3. Схема алгоритма поиска  $Z_{ij}$

Fig. 3. Scheme of the  $Z_{ij}$  searching algorithm

В блоках 2 и 3 автоматы обмениваются между собой состояниями и формируют списки инциденторов в виде  $\{d_i^0(F(d_i^0))\}$  и  $\{d_j^0(F(d_j^0))\}$ . Эти списки поступают в блок 4, где выполняются основные операции взаимозависимой дифференциации вершин в графах  $G$  и  $H$ . Основная цель выполнения 4-го блока заключается в анализе сходства списков  $\{d_i^0(F(d_i^0))\}$  и  $\{d_j^0(F(d_j^0))\}$  и, при необходимости, установлении взаимно-однозначного соответствия между однородными группами в этих списках. Если соответствие между однородными группами отсутствует, т. е.  $\{d_i^k(F(d_i^k))\} \not\cong \{d_j^k(F(d_j^k))\}$ , то оно достигается преобразованием инциденторов в записях  $d_i^k(F(d_i^k)) \Rightarrow \tilde{d}_i^k(F(\tilde{d}_i^k))$  и  $d_j^k(F(d_j^k)) \Rightarrow \tilde{d}_j^k(F(\tilde{d}_j^k))$  так, чтобы соответствие соблюдалось, т. е.  $\tilde{d}_i^k(F(\tilde{d}_i^k)) \cong \tilde{d}_j^k(F(\tilde{d}_j^k))$ . Здесь знаки  $(\not\cong)$ ,  $(\cong)$  обозначают отсутствие и наличие соответствия.

Алгоритм преобразования инциденторов  $F(d_i^k)$  и  $F(d_j^k)$  для установления соответствия между однородными группами рассмотрим на примере определения частичного изоморфизма графов  $G$  и  $H$ , представленных на рис. 4.



$e_i(F(e_i))$	$d_i^0(F(d_i^0))$	$d_i^1(F(d_i^1))$	$d_i^2(F(d_i^2))$	$d_i^3(F(d_i^3))$	$d_i^4(F(d_i^4))$	$d_i^5(F(d_i^5))$	$d_i^6(F(d_i^6))$
1(2,3,4)	2 -	2 -	2 -	2 -	2 -	2 -	<b>2(3,6,7)</b>
2(1,5,7)	1(1,1,2)	3(1,1,2)	3(1,2,4)	3(2,4,5)	6 -	6 -	<b>6(2,4,5)</b>
3(1,6,8)	1(1,1,2)	3(1,1,2)	3(1,1,2)	3(1,1,2)	3(1,1,2)	3 -	<b>3(1,2,8)</b>
4(1,5,6)	1(1,1,2)	3(1,1,2)	3(1,2,4)	3(1,2,4)	3(1,2,4)	7 -	<b>7(2,4,8)</b>
5(2,4,7,8)	1(1,1,1,1)	1(1,1,3,3)*	4 -	4 -	4 -	4 -	<b>4(1,5,6,7)</b>
6(3,4,7,8)	1(1,1,1,1)	1(1,1,3,3)*	1(1,1,3,3)	1(1,3,3,5)	1(1,3,3,5)	1(1,3,5,7)	<b>8(1,3,5,7)</b>
7(2,5,6,8)	1(1,1,1,1)	1(1,1,1,3)	1(1,1,3,4)*	5 -	5 -	5 -	<b>5(1,4,6,8)</b>
8(3,5,6,7)	1(1,1,1,1)	1(1,1,1,3)	1(1,1,3,4)*	1(1,3,4,5)	1(1,3,4,5)	1(1,3,4,5)	<b>1(3,4,5,8)</b>

$e_j(F(e_j))$	$d_j^0(F(d_j^0))$	$d_j^1(F(d_j^1))$	$d_j^2(F(d_j^2))$	$d_j^3(F(d_j^3))$	$d_j^4(F(d_j^4))$	$d_j^5(F(d_j^5))$	$d_j^6(F(d_j^6))$
1(2,3,5)	2 -	2 -	2 -	2 -	2 -	2 -	<b>2(3,6,7)</b>
2(1,5,7,8)	1(1,1,1,2)	3(1,1,2,3)	3(1,2,3,4)	3(1,2,3,4)	3(1,2,4,6)*	7 -	<b>7(2,4,6,8)</b>
3(1,4,6,7)	1(1,1,1,2)	3(1,1,1,2)	3(1,1,2,4)	3(1,1,2,4)	3(1,1,2,4)*	3 -	<b>3(1,1,2,4)</b>
4(3,6,9)	1(1,1,1)	1(1,1,3)	1(1,1,3)	1(1,1,3)	1(1,1,3)	1(1,1,3)	1(1,1,3)
5(1,2,7,10)	1(1,1,1,2)	3(1,1,2,3)	3(1,2,3,4)	3(2,3,4,5)	6 -	6 -	<b>6(2,4,5,7)</b>
6(3,4,8,9)	1(1,1,1,1)	1(1,1,1,3)	1(1,1,1,3)	1(1,1,1,3)	1(1,1,1,3)	1(1,1,1,3)	<b>1(1,1,3,8)</b>
7(2,3,5,10)	1(1,1,1,1)	1(1,3,3,3)	4 -	4 -	4 -	4 -	<b>4(3,5,6,7)</b>
8(2,6,9,10)	1(1,1,1,1)	1(1,1,1,3)	1(1,1,1,3)	1(1,1,3,5)	1(1,1,3,5)	1(1,1,5,7)	<b>8(1,1,5,7)</b>
9(4,6,8)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(1,1,1)	1(1,1,8)
10(5,7,8)	1(1,1,1)	1(1,1,3)	1(1,3,4)	5 -	5 -	5 -	<b>5(4,6,8)</b>

Рис. 4. Пример определения подстановки  $Z_{1,1}$  частичного изоморфизма графов  $G$  и  $H$

Fig. 4. Example of finding substitution  $Z_{1,1}$  of graphs  $G$  and  $H$  partial isomorphism

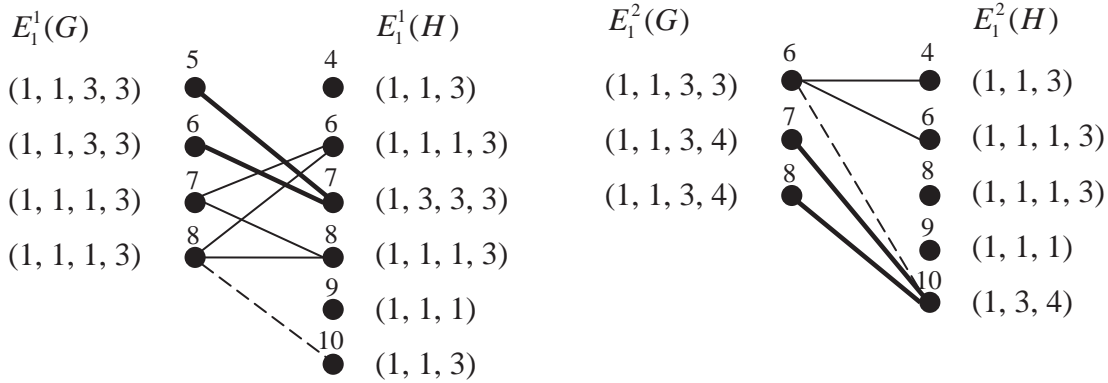


Рис. 5. Примеры сопоставления инциденторов

Fig. 5. Example of incidentors comparison

В примере на рис. 4 рассмотрен общий случай, когда графы  $G$  и  $H$  имеют разные числа вершин, рёбер и произвольные значения степеней. Процесс взаимозависимой интеграции кодов структурных различий (алгоритм ISD-ID) при поиске подстановки  $Z_{ij}$  во многом соответствует общим правилам дифференциации вершин [16]. Процесс дифференциации в этом случае дополняется алгоритмом анализа состояний моделей с целью установления соответствия между инциденторами в однородных группах (блок 4 на рис. 3).

Однородные группы, содержащие не менее двух вершин в графах  $G$  и  $H$ , с кодами  $d$  на  $k$ -м шаге дифференциации, будем обозначать  $E_d^k(G)$  и  $E_d^k(H)$ . Из рис. 4 следует, что однородные группы  $E_3^0(G)$  и  $E_1^1(H)$  по составу инциденторов  $F(d_i^0)$  и  $F(d_j^1)$  разбиваются на группы  $E_3^1(G)$ ,  $E_1^1(G)$  и  $E_3^1(H)$ ,  $E_1^1(H)$ . Для перевода моделей из состояния  $D^1$  в состояние  $D^2$  необходимо сопоставить инциденторы в соответствующих группах  $E_1^1(G)$ ,  $E_1^1(H)$  и  $E_3^1(G)$ ,  $E_3^1(H)$ . Примеры сопоставления инциденторов в группах  $E_1^1(G)$ ,  $E_1^1(H)$  и  $E_2^1(G)$ ,  $E_2^1(H)$  для переходов  $D^1 \Rightarrow D^2$  и  $D^2 \Rightarrow D^3$  приведены на рис. 5.

Цель сопоставления групп заключается в выделении пар инциденторов  $(F(d_i^k), F(d_j^k))$ , которые в наибольшей степени соответствуют друг другу. Степень соответствия, при условии  $|E_d^k(G)| \geq 2$ , будем оценивать величиной  $\delta_{ij}^k$ :

$$\delta_{ij}^k = (\alpha_{ij}^k + (\beta_{ij}^k - 1) / (|E_d^k(G)| - 1)) / \max(s_i, s_j), \quad (3)$$

где  $\alpha_{ij}^k$  – число совпадающих пар кодов  $(d_i^k, d_j^k)$ , включая одну пару единичных кодов;  $\beta_{ij}^k$  – число совпадающих пар единичных кодов в инциденторах  $F(d_i^k)$  и  $F(d_j^k)$ . Чем больше величина  $\delta_{ij}^k$ , тем выше степень соответствия инциденторов. В процессе дифференциации величина  $|E_d^k(G)|$  уменьшается, а степень соответствия возрастает. Заметим также, что для изоморфных графов  $G$  и  $H$ , при достижении полной дифференциации вершин, величина  $\delta_{ij}^k = 1$ .

В примере значения,  $\delta_{5,7}^1 = \delta_{6,7}^1 = (3+0/3)/4 = 3/4$  для  $k=1$  являются наибольшими. На рис. 5 данные соответствия выделены жирными линиями. Тонкими линиями отмечены соответствия между па-

рами инциденторов, для которых  $\delta_{7,6}^1 = \delta_{7,8}^1 = \delta_{8,6}^1 = \delta_{8,8}^1 = (2+2/3)/4 = 8/12$ . Пунктирной линией показано соответствие  $\delta_{8,10}^1 = (2+1/3)/4 = 7/12$ . Для  $k=2$  наибольшее значение имеет  $\delta_{7,10}^2 = \delta_{8,10}^2 = (3+0/2)/4 = 3/4$ , а, например,  $\delta_{6,4}^2 = \delta_{6,6}^2 = (2+1/2)/4 = 5/8$ ,  $\delta_{6,10}^2 = (2+0/2)/4 = 2/4$ .

В каждой группе пары инциденторов с наибольшими оценками  $\delta_{ij}^k$  анализируются на предмет присвоения кодов  $d_i^{k+1} = d_j^{k+1}$ . Предпочтение отдаётся возможности присвоения уникальных кодов при наличии взаимно-однозначного соответствия, как, например, для пары  $F(d_3^2) = (2, 4, 5)$  и  $F(d_5^3) = (2, 3, 4, 5)$  с оценкой  $\delta_{2,5}^3 = 3/4$  из групп  $E_3^2(G)$  и  $E_3^3(H)$  на рис. 4.

Второй по предпочтению является ситуация, когда инцидентору в одной группе присваивается уникальный код, а в другой группе несколько инциденторов являются альтернативными. Такие ситуации показаны на рис. 5, где альтернативные пары выделены жирными линиями. Аналогичная ситуация возникла также в группе  $E_3^4(H)$ . На рис. 4 альтернативные инциденторы помечены \*. Это означает, что после достижения полной дифференциации необходимо процесс поиска  $Z_{ij}$  продолжить через другие альтернативные инциденторы. В примере это инциденторы  $F(d_2^4)$ ,  $F(d_3^4)$ ,  $F(d_6^4)$ .

Третья ситуация возникает в случае, если внутри однородных групп  $E_d^k(G)$  и  $E_d^k(H)$  по наибольшим значениям оценок  $\delta_{ij}^k$  выделяются новые однородные группы.

Если полная дифференциация не достигнута и ни одна из перечисленных ситуаций не возникает, то это означает наличие устойчивых групп [25]. В этом случае процесс дифференциации продолжается согласно общим правилам на основе введения виртуальных различий.

Подстановка

$Z_{1,1} = \{e_i, e_j\} = \{(1, 1), (2, 5), (3, 3), (4, 2), (5, 7), (6, 8), (7, 10), (8, 6)\}$ , полученная в примере на рис. 4, отражает первое прохождение процесса дифференциации. Поэтому оценку сходства  $\mu(G, H) = 11/14$  можно рассматривать как нижнюю границу, которая может быть улучшена при продолжении поиска  $Z_{1,1}$  через аль-

тернативные инциденторы. Для сокращения вычислений при поиске через альтернативные инциденторы на каждом  $k$ -м шаге, согласно положению 4-го метода, вводится промежуточная оценка сходства, по которой определяется перспективность продолжения поиска.

Подстановке  $Z_{1,1}$  соответствует граф  $Q$ , рёбра которого в графах  $G$  и  $H$  на рис. 4 выделены жирными линиями, а вершины соответствуют интегральному описателю структуры (ISD) графа  $Q$ . По данному описателю можно сформировать полный инвариант  $P(Q)$  графа  $Q$ :

$$P(Q) = \{1(3,8), 2(3,6,7), 3(1,2), 4(5,6,7), 5(4,6,8), 6(2,4,5), 6(2,4,8), 8(1,5,7)\}.$$

#### Алгоритм вычисления подстановки $Z_{GH}$

Подстановка  $Z_{ij}$  соответствует частичному изоморфизму графов  $G$  и  $H$ , который локализован относительно пары вершин  $(e_i, e_j)$ . Предлагаемый ниже алгоритм организует перебор подстановок  $Z_{ij}$ ,  $i = \text{const}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_H$  и выделяет среди них подстановку  $Z_{GH}$ , определяющую частичный изоморфизм в виде графа  $Q$  с наибольшим значением  $m_Q$ . В этом случае последовательно оценивается эффективность совмещения одной из вершин графа  $G$  с вершинами графа  $H$ .

Здесь важно отметить, что в частичном изоморфизме  $Q^*$  графов  $G$  и  $H$ , полученном в результате полного перебора, в соответствующей подстановке  $Z_{GH}^*$  будет присутствовать одна из  $n_H$  пар  $(e_i, e_j)$ . Если при этом удастся доказать, что оценка  $m_Q$  частичного изоморфизма с подстановкой  $Z_{GH}$ , локализованного относительно этой пары  $(e_i, e_j)$ , совпадает с оценкой  $m_{Q^*}$  подстановки  $Z_{GH}^*$ , то проблему частичного изоморфизма можно считать решенной. Пока такого доказательства нет, говорить о нахождении наилучшей подстановки сходства  $Z_{GH}$  с помощью данного алгоритма можно лишь в случае, если  $m_Q = m_G$ . О высоком сходстве графов  $G$  и  $H$  можно говорить также, если  $m_Q = \max_{G_{HO}} \{m_{HQ}\}$ .

Рассмотрим более подробно основные операции алгоритма.

1. Формирование исходного состояния моделей графов  $G$  и  $H$ . В исходном состоянии модели должны иметь начальную дифференциацию вершин, которая достигается введением виртуальных различий. С этой целью в графах  $G$  и  $H$  выбирается по одной вершине  $e_i$  и  $e_j$ . Предпочтение отдаётся вершинам с максимальным значением степеней. Желательно также, чтобы степени вершин в паре  $(e_i, e_j)$  совпадали или были близки. Данным вершинам присваиваются коды  $d_i^0 = d_j^0 = 2$ . Остальные вершины графов получают единичные коды.

Предполагается, что при выборе вершин с высокими значениями степеней создаются условия для получения  $Z_{ij}$  с более высокой оценкой  $m_Q$ . Это позволяет сократить вычисления при последующем поиске подстановки  $Z_{GH}$ .

2. Вычисление подстановки  $Z_{ij}$ . Подстановка вычисляется по алгоритму, изложенному в предыдущем разделе. После достижения первого вари-

анта полной дифференциации вершин и получения  $Q$ , как это показано на рис. 4, определяется значение нижней границы в виде числа  $m_{GQ}^0$  не совместившихся рёбер графов  $G$  и  $Q$ ,  $m_{GQ}^0 = m_G - m_Q$ . Последующий поиск лучшего варианта  $Z_{ij}$  осуществляется с учётом проверки на  $k$ -м шаге условия  $m_G^k \geq m_{GQ}^0$ . Здесь  $m_G^k$  – суммарное число рёбер в графе  $G$ , подлежащих удалению на  $k$ -м шаге. При соблюдении этого условия делается переход к следующему альтернативному инцидентору. Если удаётся получить  $Z_{ij}$  с лучшей оценкой  $m_Q$ , то нижняя граница  $m_{GQ}^0$  пересчитывается и процесс поиска продолжается.

3. Смена вершины  $e_j$  в паре  $(e_i, e_j)$ . Новая вершина  $e_j$  назначается в пару  $(e_i, e_j)$  среди тех вершин, которые не выбирались ранее и имеют степень  $s_j$ , наиболее близкую к  $s_i$ . Далее с помощью операции 2 выполняется поиск  $Z_{ij}$  для новой пары  $(e_i, e_j)$ . При этом используется достигнутое ранее значение нижней границы  $m_{GQ}^0$ . Выполнение операций 2 и 3 повторяется до выбора всех  $e_j$  из графа  $H$ .

4. Выделение подстановки  $Z_{GH}$  и формирование графа  $Q$ . Подстановка  $Z_{ij}$ , которая соответствует текущему значению нижней границы  $m_{GQ}^0$ , принимается в качестве  $Z_{GH}$ . По соответствующим спискам записей  $\{d_i^k(F(d_i^k))\}$  определяется граф  $Q$  и его полный инвариант  $P(Q)$ . Достигнутое сходство графов оценивается величиной  $\mu(G, H)$  по выражению (2).

Оба алгоритма по большей части изложены на функциональном уровне, многие действия при этом подробно не раскрываются. Например, действия по определению оценки  $m_G^k$  требуют дополнительной проработки. Здесь на основе анализа состояний  $\{d_i^k(F(d_i^k))\}$  и  $\{d_j^k(F(d_j^k))\}$  необходимо выделить в графе  $G$  рёбра, которые безусловно не смогут быть совмещены. При этом может оказаться, что применение оценок  $m_G^k$  не даст ожидаемого эффекта. В этом случае процессы дифференциации через все альтернативные инциденторы будет выгоднее доводить до конца или использовать оценки  $m_G^k$  в особых случаях.

В изложенном виде алгоритмы оценивают сходство графов  $G$  и  $H$ , на которые не накладываются какие-либо ограничения. Вместе с тем возможны многие частные случаи, например, когда  $n_G = n_H$  или, если графы относятся к определённым типам, являются однородными и т. п. Во всех этих случаях алгоритмы могут учитывать конкретную специфику. В последующих исследованиях все подобные вопросы будут решаться при более детальной алгоритмизации, программировании и проведении экспериментальных исследований по анализу эффективности применения алгоритмов для оценивания сходства структур графов.

#### Заключение

Сходство структур графов в статье предложено оценивать, используя меру частичного изоморфизма. Полное сходство структур графов соответствует их изоморфизму, а неполное (частичное) сход-

ство – частичному изоморфизму. В качестве меры частичного изоморфизма принято наибольшее число совместившихся рёбер, которое может быть достигнуто при переборе всех вариантов совмещения (подстановки) вершин графов.

Разработке методов поиска подстановки, доставляющей наибольшее число совместившихся рёбер, посвящена данная статья. Основу метода составляет процесс взаимозависимой дифференциации вершин в сравниваемых графах, разработанных для определения их сходства в виде частичного изоморфизма. Метод не гарантирует достижение наибольшего частичного изоморфизма, но в практических применениях вполне возможны си-

туации, где оценивание сходства допустимо с некоторой погрешностью.

Основным достижением данной работы является решение, пусть и не точное, сложнейшей проблемы определения сходства структур графов на основе частичного изоморфизма. Предложенный метод создаёт теоретическую основу для разработки частных и более эффективных алгоритмов, учитывающих конкретные особенности сравниваемых графов и условия постановки задач. Развитие метода в этом направлении будет сопровождаться более полной алгоритмизацией операций, программированием и экспериментальными исследованиями эффективности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов М.Б. Графовые модели отказоустойчивости: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Саратов, 2013. – 269 с.
2. Шапошников Д.Е., Ушакова М.Н. Моделирование электрических распределительных сетей на основе концепции распределенных канальных систем // Труды ННГТУ. – 2012. – № 4 (97). – С. 111–116.
3. Кузнецов В.Г. Графовая модель системы энергосберегающих мероприятий // ВЕЖИПТ. – 2013. – № 8 (63). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/grafovaya-model-sistemy-energoberegayuschih-meropriyatiy> (дата обращения: 06.04.2015).
4. Гимаров В.А., Дли М.И., Битюцкий С.Я. Задачи нестационарной кластеризации состояния нефтехимического оборудования. – М.: Нефтегазовое дело, 2004. – 9 с.
5. Система мониторинга OpenNMS. URL: <http://habrahabr.ru/post/193682/> (дата обращения: 06.04.2015).
6. Золотовицкий А.В., Михеева Т.И., Сидоров А.В. Методы работы с графовой моделью транспортной сети в геоинформационной системе ITSGIS // Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». – 2015. – Том 2. – С. 66–70.
7. Марлей В.Е., Плотноков С.Н. Алгоритм распознавания изоморфного вложения алгоритмических сетей // Вестник ВГУ-ИТ. – 2014. – № 3. – С. 72–75.
8. Касьянов В.Н. Визуализация информации на основе графовых моделей // Доклады VII Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы сложных систем». – Ташкент, 2011. – С. 50–55.
9. Яковлев К.С., Баскин Е.С. Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2013. – № 1. – С. 5–12.
10. Андреев А.М., Можаров Г.П., Сюзев В.В. Многопроцессорные вычислительные системы: теоретический анализ, математические модели и применение: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 332 с.
11. Ильяшенко М.Б., Голдобин А.А. Решение задачи поиска изоморфизма графов для проектирования специализированных вычислителей // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2012. – № 1. – С. 31–36 (ISSN 1607–3274).
12. Скворцова М.И. Математические модели и алгоритмы в исследованиях связи между структурой и свойствами органических соединений: автореферат дис. д-ра физ.-мат. наук. – М., 2007. – 38 с.
13. Тихонина В.В., Бутенко Л.Н. Анализ взаимодействия параметров «структура–свойства» полимерных материалов // Известия ВолгГТУ. – 2010. – Т. 6. – № 8. – с. 84–86.
14. Todeschini R., Consonni V. Handbook of molecular descriptors. – Weinheim: WILEY-WCH Publishers, 2000. – 667 p.
15. Погребной А.В. Полный инвариант графа и алгоритм его вычисления // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 5. – С. 110–122.
16. Погребной А.В., Погребной В.К., Метод дифференциации вершин графа и решение проблемы изоморфизма // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 34–45.
17. Кинг Р.Б. Химические приложения топологии и теории графов. – М.: Мир, 1987. – 560 с.
18. Baskin I., Skvortsova M. On the basis of invariants of labeled molecular graphs // Chem. Inf. Comput. Sci. – 1995. – V. 35. – № 3. – P. 527–531.
19. Varmuza K. Chemometrics in practical applications. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012. – 326 p.
20. Dehmer M., Emmert-Streib F., Tsoy R.Y., Varmuza K. Quantum frontiers of atoms and molecules. – New York: Nova Publishing, 2011. – 673 p.
21. Emmert-Streib F., Dehmer M. Networks for systems biology: conceptual connection of data and function // IET Systems Biology. – 2011. – V. 5. – № 3. – P. 185–207.
22. Dehmer M., Grabner M. The discrimination power of molecular identification numbers revisited // MATCH Commun. Math. Comput. Chem. – 2013. – V. 69. – № 3. – P. 785–794.
23. De Matos S., Dehmer M., Emmert-Streib F. Interfacing cellular networks of *S. cerevisiae* and *E. coli*: connecting dynamic and genetic information // BMC Genomics. – 2013. – V. 14. – № 324. – P. 111–134.
24. Погребной В.К. Задача определения оценок сходства структур двух графов на основе выделения общих частей // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 194–199.
25. Погребной В.К., Погребной А.В. Исследование полиномиальности метода вычисления интегрального описателя структуры графа // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 146–151.

Поступила 11.09.2015 г.



UDC 519.171.1

## METHOD OF GRAPH VERTICES DIFFERENTIATION AND SOLUTION OF THE ISOMORPHISM PROBLEM IN GEOINFORMATICS

Andrey V. Pogrebnoy,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: avpogrebnoy@gmail.com

The urgency of the discussed issue is caused by the fact, that known approaches for the structures similarity estimation are limited by using a set of indirect properties. Effective similarity estimation algorithms on the basis of direct properties are necessary. Such algorithms can be applied for data compression in geographic information systems and systems of ecological monitoring if they are represented on vector map, or for pattern recognition and many other applications. Research of application of direct properties for similarity estimation on the basis of the combination of compared graphs and selecting equal parts as isomorphic subgraphs are almost absent. The problem of determining the partial isomorphism without exhaustive search permutations of similarity is considered unsolvable. Therefore researches of finding acceptable algorithms for solving this problem with limited count of permutations are relevant.

**The main aim of the study** is to develop a method for determining the graphs structure similarity by selecting the highest common parts, i.e. highest partial isomorphism.

**The methods used in the study** are based on the applied graph theory, theory of optimization and efficient algorithms development, modeling structures using automata models for vertices differentiation.

**The results.** Introduced basic concepts and formulated provisions of the concept of the graphs structure similarity estimation based on a combination of vertices and selection of equal subgraphs ? partial isomorphism. Ideas of the vertices differentiation method are suggested to be used for reducing algorithm complexity. The method of the interdependent vertices differentiation is developed, which allows to form the similarity substitution and partial isomorphism. The algorithm of searching the similarity substitutions, relative to pair of vertices, and the algorithm of selection of substitution with highest partial isomorphism are developed. The algorithm of searching similarity substitution on the basis of the interdependent vertices differentiation is shown at the example of two graphs similarity estimation.

### Key words:

Graph structure similarity, partial isomorphism, similarity substitution, vertices differentiation, homogeneous groups of vertices.

### REFERENCES

1. Abrosimov M.B. *Grafovye modeli otkazoustoychivosti*. Dis. Dokt. nauk [Resiliency graph models. Dr. Diss.]. Saratov, 2013. 269 p.
2. Shaposhnikov D.E., Ushakova M.N. Modelirovanie elektricheskikh raspredelitelnykh setey na osnove kontseptsii raspredelennykh kanalnykh sistem [Electrical distributing systems modeling at the basis of canal systems]. *Trudy NNGTU*, 2012, no. 4 (97), pp. 111–116.
3. Kuznetsov V.G. Grafovaya model sistemy energosberegayushchikh meropriyatiy [Graph model of energy-saving measures]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, vol. 63, no. 8. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/grafovaya-model-sistemy-energосberegayushchih-meropriyatiy> (accessed 6 April 2015).
4. Gimarov V.A., Dli M.I., Bityutskiy S.Ya. *Zadachi nestatsionarnoy klasterizatsii sostoyaniya neftekhimicheskogo oborudovaniya* [Problems of transient clustering of the petrochemical equipment state]. Moscow, Neftgazovoe delo Publ., 2004. 9 p.
5. *Sistema monitoringa OpenNMS* [Monitoring system OpenNMS]. Available at: <http://habrahabr.ru/post/193682/> (accessed 7 April 2015).
6. Zolotovitskiy A.V., Mikheeva T.I., Sidorov A.V. *Metody raboty s grafovoy modelyu transportnoy seti v geoinformatsionnoy sisteme ITSGIS* [Methods of work with the graph model of the transport network in the geographic information system ITSGIS]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Perspektivnye informatsionnye tekhnologii»* [Proc. Int. Scien. and Technic. Conf. Promising information technologies]. Samara, 2015, vol. 2, pp. 66–70.
7. Marley V.E., Plotnikov S.N. *Algoritm raspoznavaniya izomorfnoy vlozheniya algoritmicheskikh setey* [The algorithm of the recognition of the isomorphic enclosure of algorithmic networks]. *Vestnik VGUIT*, 2014, no. 3, pp. 72–75.
8. Kasyanov V.N. *Vizualizatsiya informatsii na osnove grafovyykh modeley* [Visualization of the information on the basis of graph models]. *Doklady VII Mezhdunarodnoy aziatskoy shkoly-seminara «Problemi slozhnykh sistem»* [Proc. 7th Int. Asian Workshop. Problems of complicated systems]. Tashkent, 2011, pp. 50–55.
9. Yakovlev K.S., Baskin E.S. *Grafovye modeli v zadache planirovaniya traektorii na ploskosti* [Graph models in the problem of the trajectory predicting at the plane]. *Artificial Intelligence and Decision Making*, 2013, no. 1, pp. 5–12.
10. Andreev A.M., Mozharov G.P., Syuzev V.V. *Mnogoprotsessornye vychislitelnye sistemy: teoreticheskiy analiz, matematicheskie modeli i primeneniye* [Multiprocessor computing systems: theoretical analysis, mathematical models and application]. Moscow, MSTU Publ., 2011. 332 p.
11. Ilyashenko M.B., Goldobin A.A. *Reshenie zadachi poiska izomorfizma grafov dlya proektirovaniya spetsialnykh vychisliteley* [Solution of the problem of graph isomorphism search for designing special computers]. *Radioelektronika, Informatika, Upravlenie*, 2012, no. 1, pp. 31–36.
12. Skvortsova M.I. *Matematicheskie modeli i algoritmy v issledovaniyakh svyazi mezhdu strukturoy i svoystvami organicheskikh soedineniy*. Avtoref. Dis. Dokt. nauk [Mathematical models and algorithms in research of connection between structure and properties of organic compounds. Author's Abstract Dr. Diss.]. Moscow, 2007. 38 p.
13. Tikhonina V.V., Butenko L.N. *Analiz vzaimodeystviya parametrov «struktura-svoystva» polumernykh materialov* [Analysis of interaction of parameters «structure-property» of polymer materials]. *Izvestiya VSTU*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 84–86.
14. Todeschini R., Consonni V. *Handbook of molecular descriptors*. Weinheim, WILEY-WCH Publishers, 2000. 667 p.
15. Pogrebnoy A.V. *Polnyy invariant grafa i algoritm ego vychisleniya* [Complete graph invariant and algorithm of its computation]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 110–122.
16. Pogrebnoy A.V., Pogrebnoy V.K. *Metod differentsiatsii vershin grafa i reshenie problem izomorfizma* [Method of the graph verti-

- ces differentiation and solution of the graph isomorphism problem], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 34–45.
17. King R.B. *Khimicheskie prilozheniya topologii i teorii grafov* [Chemical applications of graphs topology and theory]. Moscow, Mir Publ., 1987. 560 p.
  18. Baskin I., Skvortsova M. On the basis of invariants of labeled molecular graphs. *Chem. Inf. Comput. Sci.*, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 527–531.
  19. Varmuza K. *Chemometrics in practical applications*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012. 326 p.
  20. Dehmer M., Emmert-Streib F., Tsoy R.Y., Varmuza K. *Quantum frontiers of atoms and molecules*. New York, Nova Publishing, 2011. 673 p.
  21. Emmert-Streib F., Dehmer M. Networks for systems biology: conceptual connection of data and function. *IET Systems Biology*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 185–207.
  22. Dehmer M., Grabner M. The discrimination power of molecular identification numbers revisited. *MATCH Commun. Math. Comput. Chem.*, 2013, vol. 69, no. 3, pp. 785–794.
  23. De Matos S., Dehmer M., Emmert-Streib F. Interfacing cellular networks of *S. cerevisiae* and *E. coli*: Connecting dynamic and genetic information. *BMC Genomics*, 2013, vol. 14, no. 324, pp. 111–134.
  24. Pogrebnoy V.K. Zadacha opredeleniya otsenok skhodstva struktur dvukh grafov na osnove vydeleniya obshchikh chastey [Problem of estimating two graphs structure similarity on the basis of selecting common parts]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 194–199.
  25. Pogrebnoy V.K., Pogrebnoy A.V. Issledovanie polinomialnosti metoda vychisleniya integralnogo opisatelya struktury grafa [Research of the integral structure descriptor computation method polynomiality]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 146–151.

Received: 11 September 2015.

УДК 532.5.011: 532.5.013

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЩЕЛЕВОГО ФИЛЬТРА

**Виноградов Владимир Владимирович,**

аспирант каф. химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: vvv158@mail.ru

**Зыкова Юлия Александровна,**

ст. преподаватель каф. химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: ulya2279@mail.ru

**Самохвалов Николай Митрофанович,**

канд. техн. наук, профессор каф. химической технологии неорганических веществ и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: htnv@istu.edu

*Актуальность работы обусловлена необходимостью определения основных конструктивных размеров и технологических параметров при проектировании новой и малоизученной конструкции устройства для очистки газов от пыли – щелевого фильтра. Существующие сегодня методы расчета не применимы для данных пылеулавливающих устройств и дают большие расхождения при сопоставлении опытных и расчетных данных.*

**Цель исследования:** разработка алгоритма и методики расчета основных размеров и параметров процесса пылеочистки (поверхность фильтрования, скорость, гидравлическое сопротивление), базирующихся на выявленных закономерностях при исследовании эффективности очистки газа от пыли и величины гидравлического сопротивления в щелевом фильтре с различной структурой фильтрующей перегородки.

**Методы исследования.** Методика расчета основана на результатах экспериментальных исследований и проведенном теоретическом анализе процесса очистки запыленных газов фильтрованием через щелевую перегородку, с учетом стационарности процесса, структурных характеристик и степени влияния механизмов осаждения.

**Результаты.** Разработан алгоритм и методика расчета щелевого фильтра, основанная на использовании значений критического времени пребывания и граничного фактора стационарности, учитывающая снижение эффективности за счет вторичного уноса пыли. Дано обоснование выбора и корректировки принимаемых для расчета величин и необходимые рекомендации по реализации данной методики. Для упрощения расчета создана программа ЭВМ, которая, используя вводимые и полученные данные, может проводить оптимизацию размерных и технологических характеристик щелевого фильтра.

**Выводы.** Данная методика позволяет проектировать пылеочистное устройство, обладающее заданной величиной эффективности очистки, минимальным значением гидравлического сопротивления и требуемыми габаритными размерами, что поможет снизить количество вредных выбросов и уменьшить затраты на проектирование и эксплуатацию щелевого фильтра.

### **Ключевые слова:**

*Щелевой фильтр, структура щелевой перегородки, эффективность очистки, гидравлическое сопротивление, методика расчета, алгоритм расчета, фактор стационарности, время пребывания.*

Для очистки высокотемпературных, абразивных и химически агрессивных газов от пылевых частиц в химической промышленности, металлургии и строительстве целесообразно применение фильтров со щелевым фильтрующим слоем. Одним из таких устройств является разработанный нами щелевой фильтр [1] с фильтрующим слоем из навитой на специальный каркас, в несколько слоев, проволоки. Данный фильтр имеет много преимуществ по сравнению с другими пылеочистными аппаратами и в определенных условиях может обеспечивать эффективность очистки свыше 99 % при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении. Щелевой фильтр является новой конструкцией, и закономерности фильтрования газов в нем практически не изучены, а существующие методики расчета фильтрующей аппаратуры [2–7] не применимы для таких пылеочистных

устройств. В основном классический расчет фильтров для очистки запыленных газов сводится к опытному подбору толщины фильтрующего слоя и скорости процесса фильтрования.

Известные в теории фильтрования закономерности и методики расчета разработаны в основном для идеализированных структур, в частности при изучении обтекания цилиндра или шара одиночной частицей шарообразной формы. Они отражают общие закономерности, но далеки от реальных процессов очистки запыленных газов. Более того, методы расчета фильтров в большей степени разработаны для разделения суспензий, а для газов – применительно к тканевым и частично к зернистым фильтрам [8, 9]. Структура же щелевых фильтров и реальные процессы очистки, протекающие в них, существенно отличаются от тканевых и зернистых фильтров. Поэтому использовать

эти методики для расчета конкретных фильтров, в том числе щелевого фильтра, невозможно. Разработанная нами методика базируется на зависимости эффективности очистки от фактора стационарности, которым является отношение времени пребывания запыленного потока в фильтрующем слое к общей продолжительности процесса фильтрования. Этот фактор учитывает вторичный унос пыли, позволяя варьировать значениями толщины слоя, скоростью фильтрования и длительностью цикла между регенерациями для выбора оптимального варианта размеров фильтра и параметров фильтрования [10], что позволяет снизить капитальные и экономические затраты на изготовление и эксплуатацию щелевых фильтров.

#### Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлась щелевая фильтрующая перегородка со сменным числом слоев и диаметром проволоки. Гидравлическое сопротивление измерялись микроанометром с наклонной трубкой ММН-240. Расход воздуха измерялся с помощью ротаметра РМ-04–10 ГУЗ. Исследовалась эффективность очистки воздуха от угольной, цементной, песочной, мучной пыли, пылевидного поливинилхлорида и нейтрального гипохлорита кальция при скоростях от 0,01 до 0,2 м/с. Для определения размера частиц пыли и ее дисперсности использовался импактор конструкции НИИОГаз. В качестве размера частиц пыли принят медианный размер. Для характеристики сыпучести пыли использован угол естественного откоса. Плотность пыли оценивалась истинной и насыпной плотностью. Эффективность очистки измерялась весовым методом по известной методике. Отбор проб проводился аспиратором через пылеотборные трубки [11–13]. После каждого эксперимента фильтрующая перегородка очищалась от уловленной пыли, во время опыта регенерация не проводилась.

Методами исследований являлись экспериментальное изучение и теоретический анализ процессов фильтрования запыленных газов через фильтрующую щелевую перегородку.

#### Обсуждение результатов

На основе проведенных исследований и выявленных закономерностей улавливания пыли слоями проволоки разработана методика расчета щелевых фильтров, которая позволяет получить оптимальные размеры аппарата и параметры фильтрования. Её можно использовать для расчета щелевых фильтров с коридорным или шахматным способом намотки фильтрующего слоя и периодической или непрерывной регенерацией фильтрующего слоя.

Расчет щелевого фильтра, включает технологический расчет, который осуществляется с целью определения основных размеров (толщины фильтрующего слоя и поверхности фильтрования), параметров фильтрования (скорости и продолжи-

тельности цикла фильтрования, эффективности очистки, диаметра и высоты фильтрующего слоя, расчета системы регенерации) и гидравлического сопротивления аппарата. Его можно условно разделить на два основных блока: блок, отвечающий за расчет эффективности очистки, и блок определения гидравлического сопротивления.

Исходными данными для расчета являются: объемная производительность по очищаемому газу  $V$ , м<sup>3</sup>/с; заданная эффективность очистки  $\eta$ ; плотность очищаемого газа  $\rho_r$ , кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость газа  $m^2$ , Па·с; медианный размер частиц улавливаемой пыли  $\delta_{50}$ , м; плотность пыли  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>; пористость пылевого слоя  $m$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; угол естественного откоса  $\alpha$ . Исходные данные, используемые только для расчета гидравлического сопротивления щелевого фильтра: допустимое гидравлическое сопротивление  $\Delta P_d$ , Па; входная массовая запыленность  $Z_{вх}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Отдельно из исходных данных следует выделить принимаемые данные, которые выбираются ориентировочно. Корректировкой этих данных в процессе расчета можно будет получать множество вариантов окончательных результатов. Такими данными являются: высота фильтрующего слоя  $L$ , м; внутренний диаметр фильтрующего слоя  $D_\phi$ , м; длительность цикла фильтрования  $\tau$ , с; размер щели между витками и слоями проволоки –  $h_{щ}$  и  $h_{сл}$  соответственно, м; диаметр проволоки  $d_{пр}$  (м) и число слоев  $n$ ; поправочный множитель  $b$ , изначально равный 1, который необходим для уточнения значений времени пребывания.

Высота  $L$  и диаметр  $D_\phi$  фильтрующего слоя принимаются условно, например, равными 1 м. Также условно можно принять время регенерации в пределах 60–300 с, за это время устройство регенерации должно успеть пройти через весь фильтрующий слой и эффективно очистить его от уловленной пыли. Более точно значение времени регенерации выбирается в зависимости от свойств пыли и среды, входной запыленности, конструктивных особенностей системы регенерации и гидравлического сопротивления. Длительность цикла фильтрования должна быть больше или равна времени регенерации. Для обеспечения низких значений гидравлического сопротивления размер щелей между витками (шаг намотки) и слоями проволоки в фильтрующем слое должен быть более 60 мкм, размеры щелей между витками и слоями проволоки могут быть не равны между собой. Экспериментально установлен оптимальный диаметр наматываемой проволоки, он может находиться в диапазоне от 0,5 до 1,4 мм. Более тонкая проволока будет иметь низкую прочность к механическому воздействию и высоким температурам, её сложнее наматывать на каркас, соблюдая необходимые размеры щелей. Использовать для намотки проволоку толщиной более 1,4 мм также не рекомендуется в связи с увеличением затрат и ростом гидравлического сопротивления. Количество слоев проволоки, необходимое для обеспечения высокоэф-

фактивной очистки, должно быть не менее 3, но не более 7 из-за возрастания гидравлического сопротивления, ухудшения условий регенерации и увеличения затрат на намотку проволоки.

Перед началом расчета необходимо выбрать способ намотки проволоки фильтрующего слоя [14]: коридорная (рядовая) или шахматная. Коридорная намотка проволоки, по сравнению с шахматной, при прочих равных характеристиках фильтрующего слоя, обладает меньшим гидравлическим сопротивлением. Однако в фильтрующем слое, намотанном этим способом, наблюдается большее количество застойных зон, из которых сложнее выдуть пыль при регенерации. Шахматная компоновка фильтрующего слоя может обеспечить более высокую эффективность, но при этом приходится считаться с возросшим гидравлическим сопротивлением.

Подготовительной частью расчета является определение основных структурных характеристик фильтрующего слоя и параметров пылегазовой среды.

В зависимости от способа намотки проволоки определяется толщина фильтрующего слоя  $H$ , м [14]. Для коридорной намотки:

$$H = nd_{np} + h_c(n-1).$$

Для шахматной намотки:

$$H = nd_{np} + h_c(n-1) - 0,1316 \cdot d_{np}(n-1).$$

Так же, исходя из способа намотки проволоки, находится число витков в одном слое проволоки  $m_b$ . Для коридорной намотки:

$$m_b = \left( \frac{L}{d_{np} + h_{щ}} \right) + h_{щ}.$$

Для шахматной намотки:

$$m_b = \left( \frac{L}{d_{np} + h_{щ}} \right) + h_{щ} - \left( \frac{n}{2} - k \right),$$

где  $k$  – показатель четности слоев. При четном числе слоев  $k=0$ , при нечетном – 0,5. Этот показатель вводится только для шахматной намотки проволоки.

На основании полученного значения толщины и диаметра фильтрующего слоя рассчитывается диаметр витка проволоки среднего слоя (м):

$$D_{cp} = D_{\phi} + H.$$

Объем, занимаемый фильтрующим слоем  $V_{cl}$ , м<sup>3</sup>, можно найти по данной зависимости:

$$V_{cl} = \frac{\pi}{4} L((D_{cp} + H)^2 - D_{\phi}^2).$$

Длина проволоки, израсходованная на намотку всего фильтрующего слоя (м):

$$L_{np} = \pi D_{cp} m_b n.$$

Объем проволоки в фильтрующем слое  $V_{np}$ , м<sup>3</sup>, определяется:

$$V_{np} = \pi d_{np}^2 \frac{L_{np}}{4}.$$

По найденным значениям  $V_{cl}$  и  $V_{np}$  рассчитывается доля свободного объема фильтрующего слоя (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>):

$$\varepsilon_o = \frac{V_{cl} - V_{np}}{V_{cl}}.$$

Доля живого сечения  $\psi_o$ , м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, определяется по принятым значениям высоты фильтрующего слоя и размеру щелей между витками проволоки:

$$\psi_o = h_{щ} \frac{m_b + 1}{L}.$$

Влияние структурных характеристик, на основе опытных данных, можно выразить через безразмерный показатель структуры фильтрующего слоя:

$$\xi = 0,283 \frac{H(1 - \varepsilon_o)}{d_{np} \varepsilon_o},$$

где 0,283 – опытный коэффициент.

Для учета вторичного уноса пыли используется коэффициент  $k_y$ . Его предлагается рассчитывать по эмпирической зависимости от сыпучести пыли, которую характеризует тангенс угла естественного откоса, медианного размера и плотности пыли. Эта зависимость получена на основе метода анализа размерностей и имеет вид:

$$k_y = 0,01 / (\delta_{50} \rho_p \operatorname{tg} \alpha),$$

где 0,01 – опытный коэффициент.

Коэффициент пропорциональности  $A$ , зависящий от свойств очищаемого газа, можно рассчитать по уравнению:

$$A = \beta \frac{1,91 \cdot 10^{-12}}{\delta_{50}^4 \cdot \rho_p},$$

где  $\beta$  – поправочный коэффициент, изменяющийся в зависимости от плотности и вязкости пылегазовой среды:

$$\beta = \frac{g \tilde{n}_r}{29,43 \cdot 10^7 \cdot \mu^2}.$$

На основе действия параметров осаждения на процесс фильтрования в щелевом фильтре коэффициент захвата пылевых частиц фильтрующим слоем  $K_3$  предлагается рассчитывать по зависимости:

$$K_3 = \frac{g \tilde{n}_r \delta_{50}^4 \rho_p}{18 \mu^2 d_{np}}.$$

С учетом структурных характеристик фильтрующего слоя и параметров пылегазовой среды рассчитывается граничный фактор стационарности  $K_{fnp}$ :

$$K_{fnp} = e^{6,25 \ln B}, \quad (1)$$

где  $B$  – комплекс безразмерных величин. Данная зависимость хорошо согласуется с известным законом улавливания частиц однородным фильтром [15].

Комплекс  $B$  определяется следующим уравнением:

$$B = \frac{k_y}{\left(1 - \frac{\ln[1/(1-\eta)]}{\xi AK_s}\right)}$$

Подставляя значение комплекса  $B$  в уравнение (1), получим значение граничного фактора стационарности.

Зная граничный фактор стационарности и длительность цикла фильтрования можно определить время пребывания  $\tau_{np}(c)$ , которое при  $b=1$  соответствует критическому значению:

$$\tau_{np} = bK_{fгп} \tau. \quad (2)$$

По рассчитанному критическому времени пребывания, с учётом доли живого сечения, определяется скорость, при которой необходимо вести процесс фильтрования (м/с):

$$W_o = \frac{H \psi_o}{\tau_{np}}$$

Зная скорость, несложно определить поверхность фильтрования  $F$ , м<sup>2</sup>, исходя из заданной производительности:

$$F = \frac{V}{W_o}$$

По найденной поверхности при проектировании уточняются рабочие значения высоты  $L$  и внутреннего диаметра фильтрующего слоя  $D_\phi$ .

Проводится расчет эффективности очистки на основе принятых и полученных параметров фильтрования. Для этого определяется расчетный показатель структуры фильтрующего слоя:

$$\xi_p = \frac{0,0846 \cdot H(1 - \varepsilon_o)}{d_{np} \varepsilon_o},$$

где 0,0846 – опытный коэффициент.

Показатель вторичного уноса пыли  $K_n$  рассчитывается по следующему уравнению:

$$K_n = 1 - \frac{k_y}{(\tau_{np} / \tau)^{0,16}}. \quad (3)$$

В уравнении (3) используется фактор стационарности, которым является отношение рассчитанного по уравнению (2) критического времени пребывания к общей продолжительности процесса фильтрования [10].

Расчетная эффективность  $\eta_p$  определяется по формуле, в которой учитывается влияние скорости на процесс очистки:

$$\eta_p = 1 - e^{-\xi_p \eta_o \frac{W_o}{W_o} K_n}$$

Если полученное значение эффективности очистки будет больше или равно заданной, то расчет по определению скорости и поверхности фильтра заканчивается. В ином случае производится циклическая корректировка значения критического времени пребывания при помощи поправочного множителя  $b$ , к которому будет прибавляться поправка

$$b = b + 0,01,$$

где 0,01 – шаг поправки.

Если  $b$  будет равно 1,3, а расчетная эффективность очистки по-прежнему меньше заданной, то необходимо скорректировать принимаемые данные. Поправочный множитель  $b$  снова приравнивается к единице.

При расчете гидравлического сопротивления принимается механизм фильтрования с образованием осадка внутри каналов щелевого слоя. Этот расчет включает в себя: расчет гидравлического сопротивления чистого фильтрующего слоя [14]; расчет сопротивления пылевого осадка; определение общего гидравлического сопротивления.

Расчет сопротивления чистого фильтрующего слоя необходимо начинать с определения его удельной поверхности (м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>):

$$f = \frac{\pi d_{np} L_{np}}{V_{сл}}$$

Коэффициент извилистости (кривизны) каналов щелевого слоя  $\zeta$  можно выразить через долю свободного объема по уравнению [16]:

$$\zeta = 1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \cdot (1 - \varepsilon_o)^{2/3}.$$

Критерий Рейнольдса для модели обтекания частицы  $Re_\zeta$  [17] определяется:

$$Re_\zeta = \frac{W_o d_{np} \rho_r}{\varepsilon_o \mu}$$

Коэффициент сопротивления фильтрующего слоя  $\lambda_c$  рассчитывается применительно к внешней задаче гидродинамики [16]:

$$\lambda_c = 2\zeta^3 \left[ \frac{4 - 3\varepsilon_o}{\varepsilon_o} \cdot \frac{3}{Re_\zeta \zeta} + 0,017 \left( \frac{2\varepsilon_o}{3(1 - \varepsilon_o)} Re_\zeta \zeta \right)^{-0,18} \right] + 2,5\zeta^3 [0,45(Re_\zeta \zeta)^{-4/9} + 0,042].$$

Гидравлическое сопротивление чистого фильтрующего слоя  $\Delta P_\zeta$  находится по зависимости, полученной на основе уравнения М.Э. Аэрова [18] с учетом доли живого сечения и изменения числа слоев проволоки. В зависимости от количества слоев применяются разные формулы. Установлено, при числе слоев проволоки от 2-х до 4-х сопротивление изменяется по степенной зависимости, а при  $n > 4$  эта зависимость линейная. Тогда, при  $n=2-4$ , используется степенная зависимость от числа слоев проволоки:

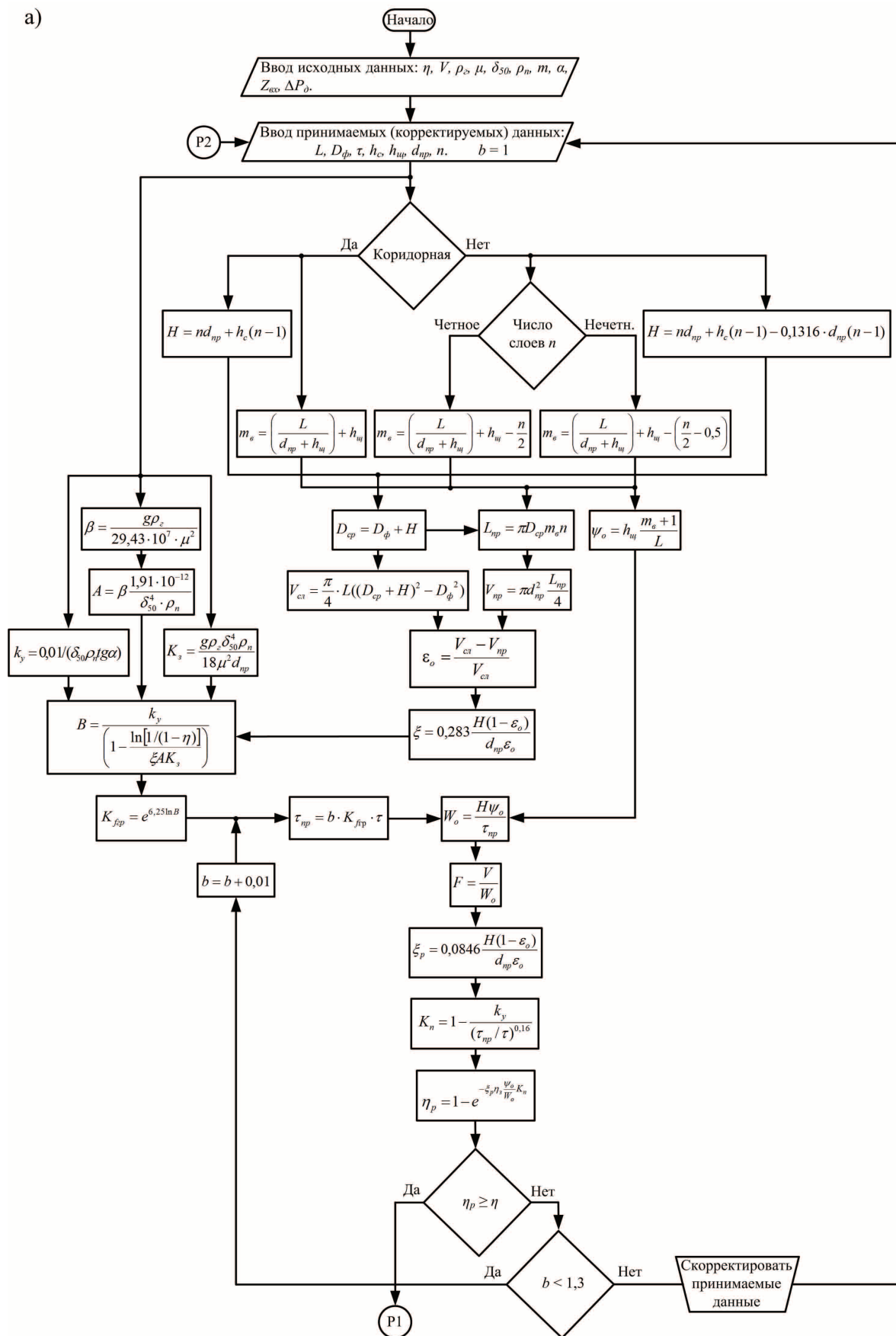
$$\Delta P_\zeta = \lambda_c n^{(1+0,1n)} \cdot \frac{(1 - \psi_o)}{2} \cdot \frac{f(1 - \varepsilon_o) \rho_r W_o^2 H}{2\psi_o^3}$$

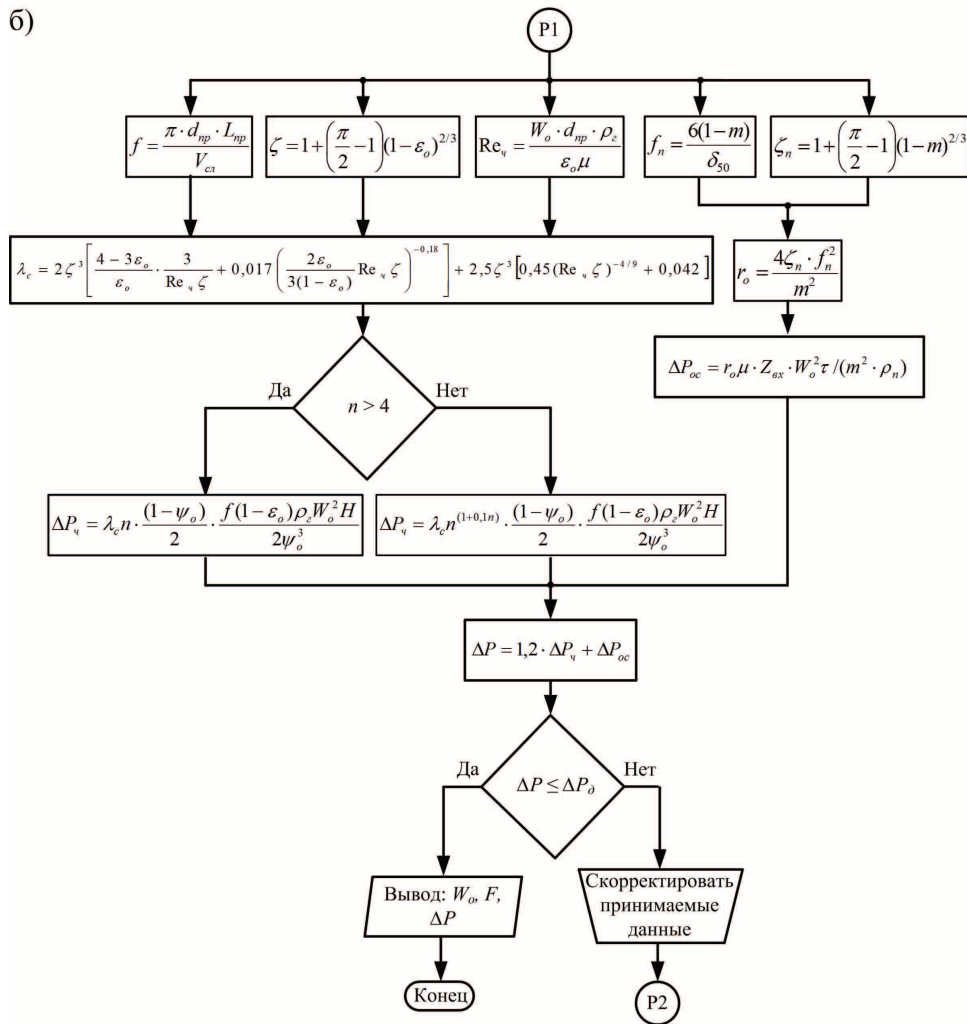
При  $n > 4$  используется линейная зависимость:

$$\Delta P_\zeta = \lambda_c n \cdot \frac{(1 - \psi_o)}{2} \cdot \frac{f(1 - \varepsilon_o) \rho_r W_o^2 H}{2\psi_o^3}$$

Для расчета гидравлического сопротивления пылевого осадка необходимо определить:

a)





**Рисунок.** Блок-схема расчета основных параметров щелевого фильтра: а) эффективности очистки; б) гидравлического сопротивления

**Figure.** Block diagram for calculating the basic parameters of slotted filter: a) cleaning efficiency; b) hydraulic resistance

- удельную поверхность пыли ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ )

$$f_{\text{п}} = \frac{6(1-m)}{\delta_{50}}$$

- коэффициент кривизны пылевых каналов  $\zeta_{\text{п}}$  по формуле [16]

$$\zeta_{\text{п}} = 1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) (1-m)^{2/3};$$

- удельное сопротивление пыли ( $\text{м}^{-2}$ )

$$r_o = \frac{4\zeta_{\text{п}} f_{\text{п}}^2}{m^2}.$$

Гидравлическое сопротивление пылевого осадка  $\Delta P_{\text{ос}}$  определяется на основе уравнения

$$\Delta P_{\text{ос}} = r_o \mu Z_{\text{вх}} W_o^2 \tau / (m^2 \rho_{\text{п}}),$$

которое получено путем преобразования уравнения Пуазейля [9].

Общее гидравлическое сопротивление  $\Delta P$  рассчитывается как сумма сопротивлений чистого

фильтрующего слоя и сопротивления, создаваемого пылевым осадком:

$$\Delta P = 1,2 \cdot \Delta P_{\text{ч}} + \Delta P_{\text{ос}}.$$

Для обеспечения надежности полученных результатов сопротивление чистого фильтрующего слоя в этой зависимости берется с запасом 20 %.

При значении расчетного гидравлического сопротивления больше допустимого производится корректировка принимаемых для расчета величин. Для корректировки можно изменять расстояния между слоями и витками проволоки или диаметр проволоки.

В соответствии с рассмотренной методикой составлена блок-схема алгоритма расчета, представленная на рисунке. На основе этой блок-схемы разработана программа для ЭВМ по расчету щелевого фильтра с использованием языка Action Script на базе мультимедийной платформы Adobe Flash [19]. Она упрощает расчет и позволяет выбирать оптимальные значения основных параметров процесса фильтрования.



Основываясь на полученных в ходе расчета параметрах, можно рассчитать характеристики системы регенерации щелевого фильтра [20]. По скорректированной длительности цикла фильтрования определяется необходимое время перемещения продувочного сопла вдоль и вокруг своей оси. С учетом структурных характеристик фильтрующего слоя и условий регенерации принимается диаметр продувочного сопла и его расстояние до фильтрующей перегородки. Расход продувочного воздуха рассчитывается с учетом затрат воздуха на реактивное сопло. Расчет основан на определении силы тяги и центробежной силы, создаваемых реактивным соплом. По полученным характеристикам системы регенерации, принимая во внимание высоту фильтрующего барабана, рассчитывается механизм вертикального перемещения сопел вдоль своей оси. Затем определяются передаточное

число редуктора и мощность двигателя, который приводит в движение продувочную трубу с расположенной на ней газораспределительной камерой с реактивным и продувочным соплом.

#### Выводы

Разработана методика, алгоритм и программа расчета для проектирования щелевого фильтра. Методика позволяет определять конструктивные размеры и технологические параметры щелевого фильтра на основе исследований эффективности и гидравлического сопротивления при очистке газа от пыли с использованием значений критического времени пребывания и граничного фактора стационарности. Даны пояснения и необходимые рекомендации для реализации данной методики расчета. Программа выполняет оптимизацию рабочих параметров процесса фильтрования и размеров щелевого фильтра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фильтр для очистки газа от пыли: пат. 104863 РФ. МПК В01Д 46/00. Заявл. 16.12.2010; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15. – 2 с.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
3. Красовицкий Ю.В., Дуров В.В. Обеспыливание газов зернистыми слоями. – М.: Химия, 1991. – 91 с.
4. Guo-hua Yang, Jiang-hua Zhou. Experimental Study on a New Dual-Layer Granular Bed Filter for Removing Particulates // Journal of China University of Mining & Technology. – 2007. – V. 17. – № 2. – P. 201–204.
5. Henriquez V., Macias-Machin A. Holt gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF) // Chemical Engineering and processing. – 1997. – V. 36 – Iss. 5. – P. 353–361.
6. Lawrence K., Norman C., Yung-Tse Hung. Air Pollution Control Engineering. – New York: Humana Press Inc., 2004. – 628 p.
7. Анжеуров Н.М., Вальдберг А.Ю., Красовицкий Ю.В. Анализ современного состояния теории процесса фильтрации аэрозолей (применительно к практике инженерных расчетов) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды: обзорная информация. – М.: РАН. ВИНТИ, 2000. – № 5. – С. 24–42.
8. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Моргулис М.Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
9. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 430 с.
10. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Стационарность процесса и эффективность очистки газов от пыли в щелевом фильтре //

- Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 6. – С. 690–694.
11. Биргер М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
12. Балтренас П., Шпакаускас В. Методы и приборы определения физико-механических и химических свойств пылей и аэрозолей. – Вильнюс: Техника, 1994. – 204 с.
13. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. – М.: Химия, 1978. – 207 с.
14. Виноградов В.В., Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 3–10.
15. Ужов В.Н., Мягков Б.И., Вальдберг А.Ю. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
16. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1984. – 104 с.
17. Гусев А.А. Гидравлика. – М.: Юрайт, 2013. – 285 с.
18. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – М.: Химия, 1968. – 510 с.
19. Moock C. Essential ActionScript 3.0. – Sebastopol.: O'Reilly Media, 2008. – 948 p.
20. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. 2-е изд. – М.: Химия, 2008. – 496 с.

Поступила 29.09.2015 г.

UDC 532.5.011: 532.5.013

#### CALCULATION OF A SLOTTED FILTER

Vladimir V. Vinogradov,  
Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk,  
664074, Russia. E-mail: vvv158@mail.ru

Yulia A. Zykova,  
Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk,  
664074, Russia. E-mail: ulya2279@mail.ru

Nikolay M. Samokhvalov,

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia. E-mail: htnv@istu.edu

Relevance of the work is caused by the need to identify the main structural dimensions and process parameters in designing new and little-studied structure of the device for cleaning gases from dust – slotted filter. The existing methods for calculation are not applicable for these dedusting devices and give large differences when comparing the experimental and calculated data.

**The main aim** of the research is to develop the algorithm and the method of calculating the basic dimensions and parameters of the process dust cleaning (surface filtration, speed, hydraulic resistance) based on identification of patterns when studying the efficiency of gas cleaning from dust and the value of hydraulic resistance in the slotted filter with different structures of the filter septum.

**Methods.** The calculation technique is based on the results of experimental studies and theoretical analysis of cleaning dusty gas by filtration through the slotted septum, taking into account the process is stationary, the structural characteristics and impact mechanisms of precipitation.

**Results.** The authors have developed the algorithm and the method for calculating the slotted filter, based on the use of the critical residence time and limit stationary factor that takes into account the loss of efficiency due to re-entrainment of dust. The paper introduces the substantiation of selection and adjustment of the quantities adopted for calculation and necessary recommendations for implementation of this technique. To simplify the calculation the computer program was developed. The latter can optimize dimensional and technological characteristics of the slotted filter using the input and the obtained data.

**Conclusions.** This technique allows designing dust removal device with a predetermined quantity of cleaning efficiency, minimum value of hydraulic resistance and the required dimensions, which will help reduce the amount of harmful emissions and reduce the cost for designing and operating the slotted filter.

#### Key words:

Slotted filter, slotted septum structure, cleaning efficiency, hydraulic resistance, calculation method, calculation algorithm, stationary factor, residence time.

#### REFERENCES

- Samokhvalov N.M. *Filtr dlya ochistki gaza ot pyli* [Filter for gas cleaning from dust]. Patent RF, no. 104863, 2011.
- Pirumov A.I. *Obespylivaniye vozdukh* [Dedusting air]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 296 p.
- Krasovitskiy Yu.V., Durov V.V. *Obespylivaniye gazov zernistymi sloyami* [Dedusting gas granular layers]. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 91 p.
- Yang G.H., Zhou J.H. Experimental study on a new dual-layer granular bed filter for removing particulates. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 201–204.
- Henriquez V., Macias-Machin A. Holt gas filtration, using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF). *Chemical Engineering and Processing*, 1997, vol. 36, iss. 5, pp. 353–361.
- Lawrence K., Norman C., Hung Y.T. *Air pollution control engineering*. New York, Humana Press Inc. Publ., 2004. 628 p.
- Anzheurov N.M., Valdberg A.Yu., Krasovitskiy Yu.V. Analiz sovremennogo sostoyaniya teorii protsessy filtratsii aerorozley (primenitelno k praktike inzhenernykh raschetov) [Analysis of the current state of the theory of aerosol filtration (with reference to the practice of engineering calculations)]. *Nauchnyye i tekhnicheskiye aspekty okhrany okruzhayushchey sredy: obzornaya informatsiya*. Moscow, RAN. VINITI Publ., 2000, no. 5, pp. 24–42.
- Mazus M.G., Malgin A.D., Morgulis M.L. *Filtry dlya ulavlivaniya promyshlennykh pyley* [Filters for industrial dust collecting]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
- Zhuzhikov V.A. *Filtrovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of separation of suspensions]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 430 p.
- Samokhvalov N.M., Vinogradov V.V. Statsionarnost protsessy i effektivnost ochistki gazov ot pyli v shchelevom filtrе [Stationary and efficiency of cleaning dust from gases on slotted filter]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 837–841.
- Birger M.I. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu* [Handbook of dust and ash collection]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 320 p.
- Baltrenas P., Shpakauskas V. *Metody i pribory opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh i khimicheskikh svoystv pyley i aerorozley* [Methods and tools for determination of physical-mechanical and chemical properties of dusts and aerosols]. Vilnius, Tekhnika Publ., 1994. 204 p.
- Klimenko A.P. *Metody i pribory dlya izmereniya kontsentratsii pyli* [Methods and instruments for measuring the concentration of dust]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 207 p.
- Vinogradov V.V., Zykova Yu.A., Samokhvalov N.M. Vliyaniye struktury shchelevogo filtra na gidravlichesкое soprotivlenie [Effect of the slot filter structure on the hydraulic resistance]. *Izvestiya Ran. Fluid dynamics*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 463–470.
- Uzhov V.N., Myagkov B.I., Valdberg A.Yu. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Purification of industrial gases from dust]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 392 p.
- Ostrovskiy G.M. *Pnevmaticheskiy transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti* [Pneumatic transport of bulk materials in the chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 104 p.
- Gusev A.A. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Yurayt Publ., 2013. 285 p.
- Aerov M.E., Todes O.M. *Gidravlicheskiye i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym sloyem* [Hydraulic and thermal basics of devices with fixed and fluidized granular layer]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 510 p.
- Moock C. *Essential ActionScript 3.0*. Sebastopol, O'Reilly Media Publ., 2008. 948 p.
- Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Khimiya Publ., 2008. 496 p.

Received: 29 September 2015.

УДК 620.92

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБЪЕДИНЕНИЙ, ЗАПИТАННЫХ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

**Звонарева Юлия Николаевна,**

старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики и системы теплоснабжения Казанского государственного энергетического университета, Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51.  
E-mail: Skulinaun@mail.ru

**Ваньков Юрий Витальевич,**

д-р тех. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики и системы теплоснабжения Казанского государственного энергетического университета, Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: Yvankov@mail.ru

*Актуальность работы заключается в оптимизации режимов совместной работы двух и более источников тепловой энергии, действующих в границах крупных городов и муниципальных объединениях, для получения наиболее энергоэффективного результата.*

**Цель исследования.** Решение существующих проблем тепловых источников (районных котельных и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ)), связанных со способом генерации тепла, поиск вариантов оптимизации тепловых схем, в частности систем теплоснабжения в целом в границах городов, а также улучшение экономических показателей работы тепловых сетей и тепловых источников для повышения качества теплоснабжения и увеличения энергетической эффективности.

**Методы исследования.** Моделирование режимов отпуска тепла системы теплоснабжения при помощи электронной модели, созданной на базе программного комплекса Zulu, для оценки возможности оптимального перераспределения отпуска сетевой воды между ТЭЦ и районной котельной с учетом технико-экономических показателей.

**Результаты.** Проведен анализ фактических и перспективных технико-экономических показателей совместной работы ТЭЦ и районной котельной крупного муниципального объединения, определен резерв тепловой мощности ТЭЦ, предложены варианты наиболее эффективного использования тепловых схем источников как в отопительный, так и в неоперительный период, рассчитана экономия топлива для рассматриваемой системы теплоснабжения.

**Выводы.** Мероприятия по оптимизации тепловых схем рассматриваемых источников теплоснабжения позволяют создавать наиболее эффективные режимы совместной работы районных котельных и ТЭЦ. Полученные результаты направлены на энергосбережение и оптимальную работу системы теплоснабжения, запитанной одновременно от нескольких источников тепловой энергии, действующих в границе крупного города или муниципального объединения.

### **Ключевые слова:**

Система теплоснабжения, оптимизация, теплофикационный отбор, загрузка теплоисточника, экономия топлива.

В настоящее время в системах теплоснабжения городов накоплено множество проблем, связанных с их качеством и надежностью [1], решать которые необходимо с точки зрения энергетической эффективности.

Чтобы повысить качество и эффективность теплоснабжения, требуется не только обновить парк существующего оборудования, поменять схемно-технологические решения, но и оптимизировать сам тепловой рынок [2].

Актуальными задачами на сегодняшний день являются:

- оптимизация систем теплоснабжения в границах городов;
- повышение энергетической эффективности и качества теплоснабжения;
- улучшение экономических показателей работы тепловых сетей и ТЭЦ [3].

Для решения поставленных задач в системах теплоснабжения нужны радикальные перемены, во многом относящиеся к потребительскому рынку.

Во-первых, следует детально зафиксировать проблемы, связанные со способом генерации тепла. Теплоснабжение в крупных городах представлено

обычно двумя секторами – крупными источниками тепла и районными котельными [4]. В первом случае источниками тепла служат теплоэлектроцентрали, или ТЭЦ, – предприятия, на которых осуществляется совместная выработка тепловой и электрической энергии. Практически вся электроэнергия вырабатывается на крупных ТЭЦ [5].

Во втором случае в тепловые сети поступает тепло, вырабатываемое в больших и маленьких котельных.

По сравнению с тепловой энергией электрическая энергия более универсальна, поэтому теплоэлектростанция – гораздо более ценный энергоисточник по сравнению с котельной. С развитием цивилизации рост потребности в электрической энергии значительно опережает рост потребности в тепловой, идущей на нагрев помещений и в системы горячего водоснабжения. Электроэнергии в стране в ближайшее время будет остро не хватать [6].

Концепция теплоэлектроцентралей, расположенных в городах, состоит в том, что, находясь в центре тепловых нагрузок, ТЭЦ отдают тепловую энергию на полезные нужды и в тепловые сети. Загрузка ТЭЦ по теплу в первую очередь зависит от

потребностей города [7]. При этом котельные должны получать только ту нагрузку, которая не может быть выработана синхронно с выработкой электроэнергии на ТЭЦ. Надо всемерно содействовать эффективной загрузке ТЭЦ, наращиванию теплофикационных мощностей, переводу мощностей котельных в пиковый или резервный режим работы [8].

Основным принципом оптимизации систем теплоснабжения является закольцовка магистральных сетей, чтобы можно было от любой станции в любой момент подать необходимое количество тепла. Загрузка ТЭЦ должна быть максимально эффективной, а отопительные котельные должны загружаться по «остаточному» принципу [9].

Городские теплосети, запитываемые от ТЭЦ и котельных, представляют сложные разветвленные гидравлические системы. В практике их эксплуатации основными проблемами являются недостаточный перепад давления между прямым и обратным трубопроводом, повышенное давление в обратном трубопроводе, разрегулированность сети у потребителей и т. д.

Причинами указанных проблем могут быть:

- повышенный расход теплоносителя;
- недостаточный диаметр трубопроводов;
- уменьшение внутреннего диаметра труб из-за отложений.

Эффективным инструментом для определения основных проблем, имеющих в любой конкретной теплосети, являются компьютерные модели, которые дают возможность воспроизвести гидравлический и тепловой режим сети.

Моделирование режимов отпуски тепла при помощи электронной схемы позволяет анализировать экономичность различных вариантов загрузки теплофикационного оборудования источников тепла, а именно изменение удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии с учетом возможностей тепловой сети по передаче тепловой энергии.

Для анализа и оптимизации режимов отпуски тепла с учетом подключения новых потребителей в ходе выполнения работы на базе программного комплекса Zulu авторами статьи была разработана электронная модель системы теплоснабжения г. Казани.

Город Казань расположен в среднем течении реки Волги и разбит руслом реки Казанка на северную и южную части города.

Теплоснабжение северного района города осуществляется от трех крупных источника тепла: Казанская ТЭЦ-2 (КТЭЦ-2), Казанская ТЭЦ-3 (КТЭЦ-3) и отопительная котельная РК «Савиново».

Теплоснабжение южного района города осуществляется от Казанской ТЭЦ-1 (КТЭЦ-1), водогрейных котельных РК «Азино» и РК «Горки-2».

Для оценки повышения экономичности загрузки тепловых источников, анализа возможности переключения тепловодов и внесения изменений в схемах тепловых источников для перераспределе-

ния отпуска тепловой энергии объектом исследования были выбраны Казанская ТЭЦ-1 и районная котельная «Азино» [10].

Установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 220 МВт, тепловая – 630 Гкал/ч. Основным топливом является природный газ, в качестве резервного топлива используется мазут. Исследуемая ТЭЦ является источником теплоснабжения в виде пара и в горячей воде предприятий промышленного района г. Казани, включая жилой массив. Параметры отпускаемого пара составляют 30 и 13 ата. Отпуск тепла с горячей водой осуществляется по трем тепловодам.

Кроме того, в состав станции входит водогрейная районная котельная тепловой мощностью 360 Гкал/ч. Между станцией и котельной существует трубопровод-перемычка.

В ходе работы были проанализированы:

- фактический отпуск тепловой энергии;
- расход топлива на отпуск тепловой энергии;
- отпуск тепловой энергии и расход топлива при рассматриваемых вариантах перераспределения тепла между ТЭЦ и районной котельной.

Для наглядности на рис. 1 и 2 приведены фактические показатели работы рассматриваемых тепловых источников.

Суммарная тепловая нагрузка, отпускаемая с источника теплоснабжения ТЭЦ на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение, рассчитывалась по формуле

$$Q_{\text{тэц}} = Q'_{\text{ов}} \cdot \bar{Q}_{\text{ов}} + Q_{\text{гвс}}^{\text{ср.н}} = Q'_{\text{ов}} \cdot (\bar{Q}_{\text{ов}} + \rho), \quad (1)$$

где  $Q'_{\text{ов}}$  – расчетная тепловая нагрузка ТЭЦ;  $\bar{Q}_{\text{ов}}$  – относительная тепловая нагрузка отопления и вентиляции;  $Q_{\text{гвс}}^{\text{ср.н}}$  – средненедельная тепловая нагрузка ТЭЦ в горячей воде;  $\rho = \frac{Q_{\text{гвс}}^{\text{ср.н}}}{Q'_{\text{ов}}}$  – относительная

нагрузка горячего водоснабжения.

Величина тепловой нагрузки, переданной с котельной на ТЭЦ после перераспределения тепловой нагрузки между источниками, найдена по формуле

$$Q_{\text{кот}}^{\text{перед.}} = (Q'_{\text{ов}})_{\text{перед.}} \cdot \bar{Q}_{\text{ов}} + (Q_{\text{гвс}}^{\text{ср.н.}})_{\text{перед.}} = (Q'_{\text{ов}})_{\text{перед.}} \cdot (Q_{\text{ов}} + \rho), \quad (2)$$

где  $(Q_{\text{гвс}}^{\text{ср.н.}})_{\text{перед.}}$  – средненедельная нагрузка ГВС котельной, переданная на ТЭЦ [11].

Из формул (1) и (2) определяется суммарная тепловая нагрузка на ТЭЦ после перераспределения:

$$Q_{\text{тэц}} + Q_{\text{кот}}^{\text{перед.}} = Q_{\text{тэц}} \cdot \left( 1 + \frac{(Q'_{\text{ов}})_{\text{перед.}}}{Q'_{\text{ов}}} \right).$$

При этом следует учесть, что дополнительный отпуск тепловой нагрузки от ТЭЦ, происходящий за счет теплофикационных отборов турбин, и увеличение тепловой нагрузки возможно до момента, когда:

- мощность теплофикационных отборов не достигла номинального значения;

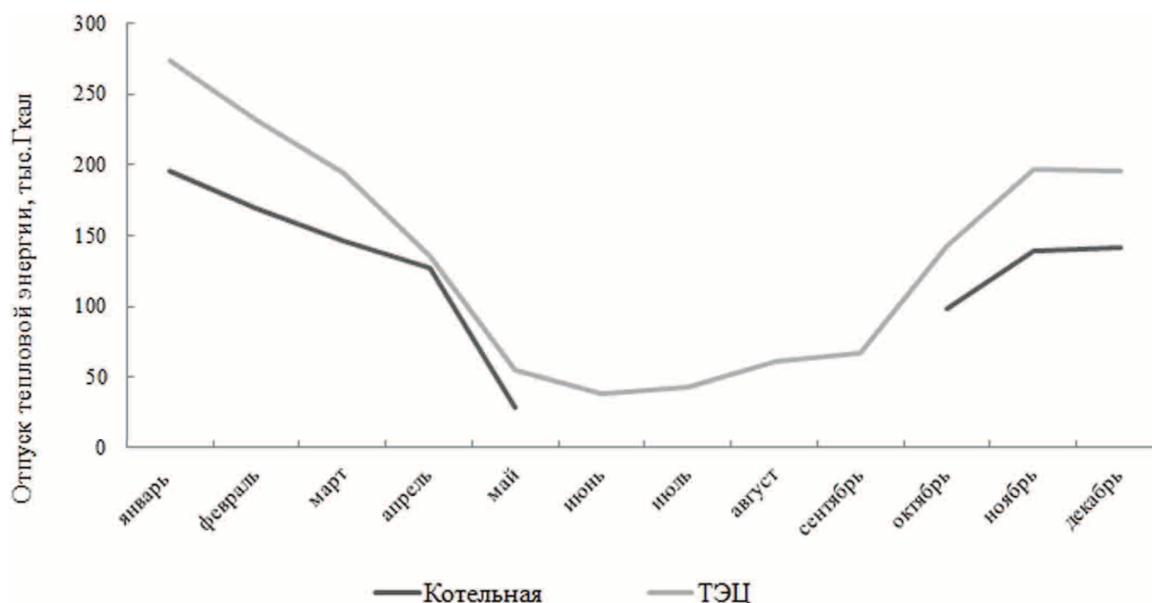


Рис. 1. Годовой отпуск тепла от ТЭЦ и котельной

Fig. 1. Annual heat supply from a combined heat and power plant and a boiler room

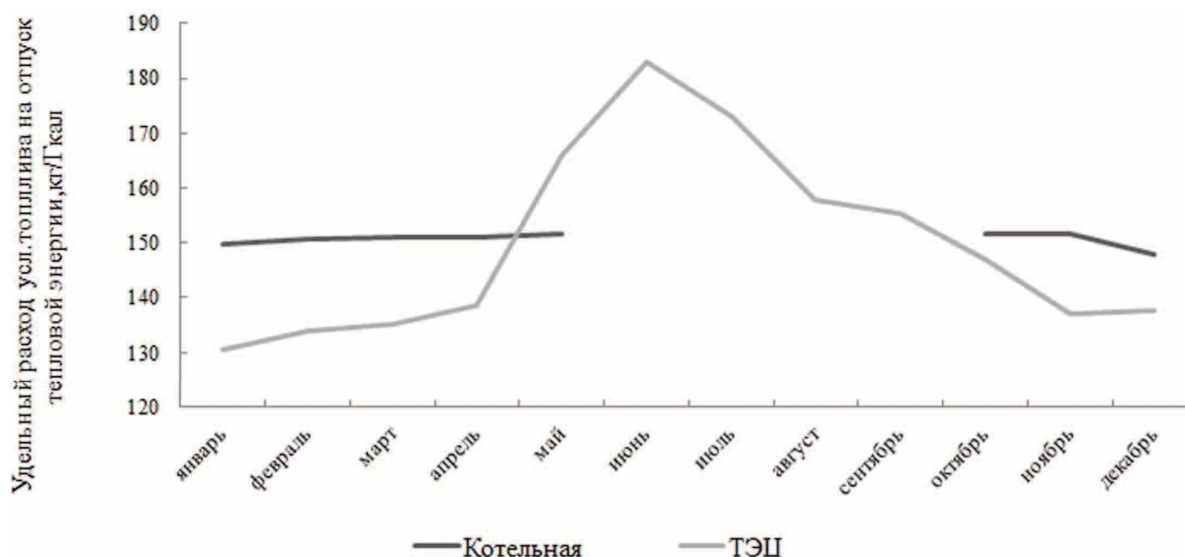


Рис. 2. Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии от ТЭЦ и котельной

Fig. 2. Specific consumption of conditional fuel on thermal energy supply from a combined heat and power plant and a boiler room

- температура сетевой воды после ПСГ не достигла максимального значения [12].

Для увеличения отпуска тепловой энергии от ТЭЦ в переходный и зимний период было предложено на районной котельной произвести изменения в тепловой схеме (выполнить монтаж линии смещения) согласно рис. 3.

Передача тепловой нагрузки от котельной на ТЭЦ по предложенной схеме позволяет сохранить рабочий температурный график тепловой сети после сетевого подогревателя и иметь дополнительную загрузку теплофикационных отборов турбин во всем диапазоне температур наружного воздуха [13].

Исходными данными для расчета приняты расчетные тепловые нагрузки отопления и вентиляции, доля ГВС на источниках теплоснабжения, расчетный температурный график тепловой сети, а также тепловая мощность отборов турбин и теплофикационной установки. На основании расчетных графиков тепловой сети и графиков отпуска тепла рассчитан новый график отпуска тепла с источников теплоснабжения после перераспределения тепловой нагрузки [14]. Структура тепловой нагрузки на источниках теплоснабжения одинакова, поскольку источники находятся в одном тепловом узле.

Согласно приведенной схеме в отопительный период прямая сетевая вода, которая приходит по

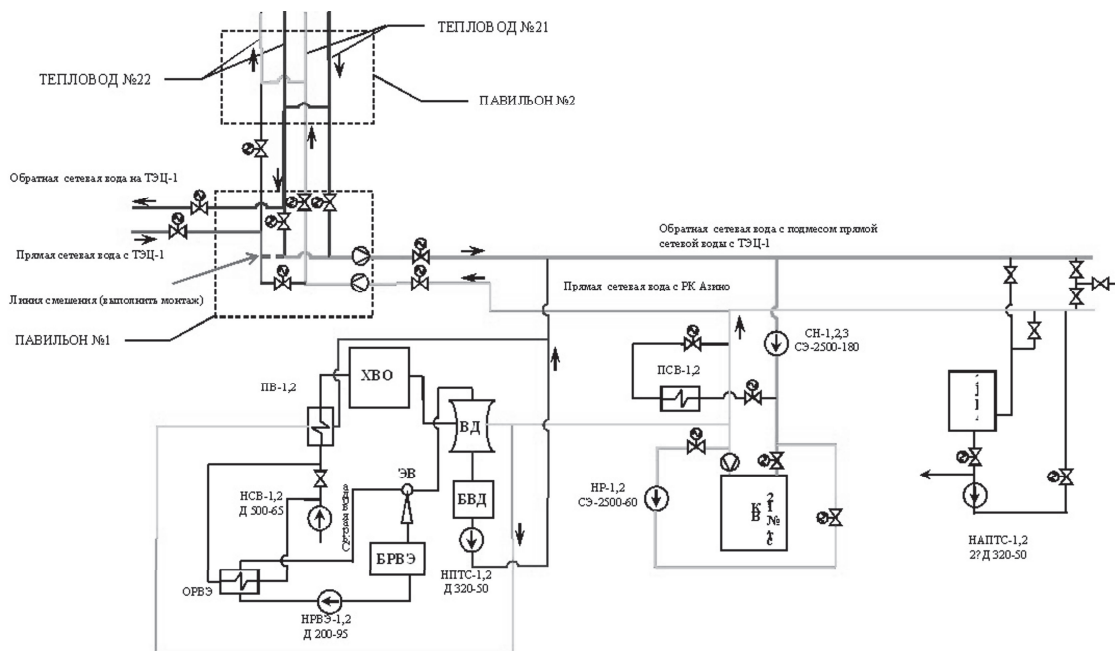


Рис. 3. Предлагаемая принципиальная схема работы районной котельной в зимний и переходный периоды

Fig. 3. The offered schematic diagram of work of a regional boiler room during winter and transition periods

перемычке с ТЭЦ, будет смешиваться с обратной сетевой водой, приходящей с тепловодов от котельной. При этом в котлы будет поступать обратная сетевая вода с повышенной температурой, догреваться до температуры согласно температурному графику тепловой сети и вырабатывать тепло за отопительный сезон в среднем на 62 Гкал/ч меньше.

Для качественного теплоснабжения в летний период также предлагается произвести изменения в тепловой схеме (рис. 4) и использовать котельную в качестве повысительной насосной станции (ПНС), что позволит увеличить пропускную способность трубопровода-перемычки [15] между котельной и ТЭЦ и разгрузить существующие ПНС.

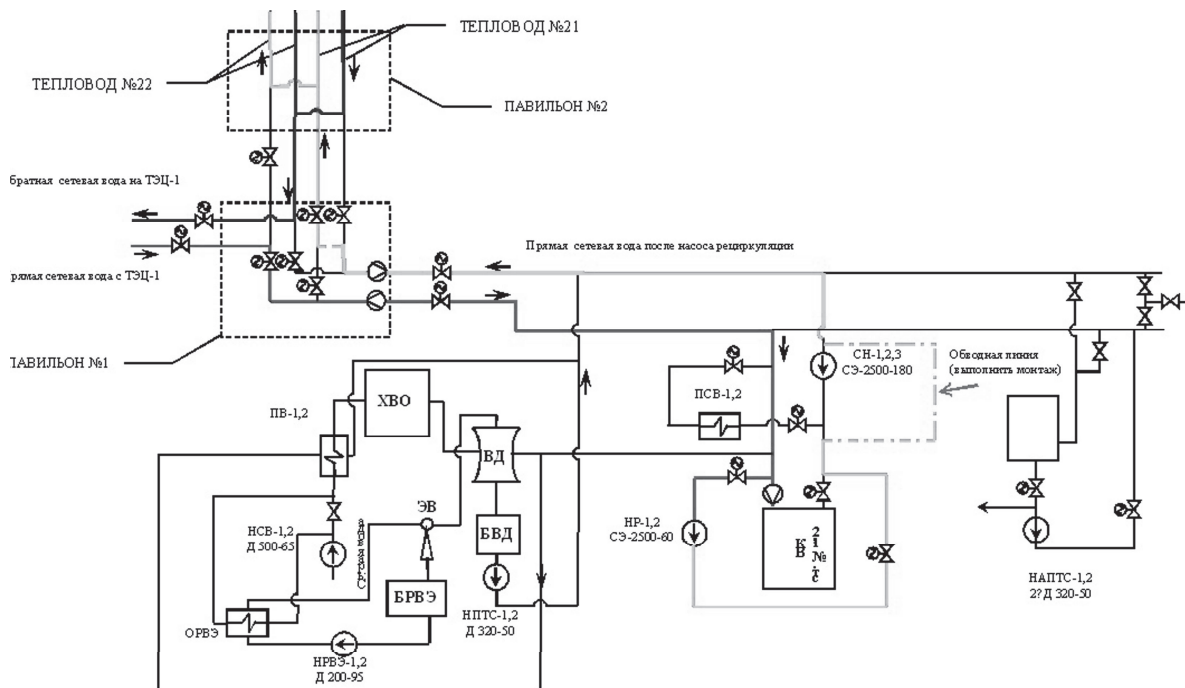


Рис. 4. Принципиальная схема работы котельной в летнее время в качестве ПНС

Fig. 4. The schematic diagram of work of a boiler room in summertime as PHS

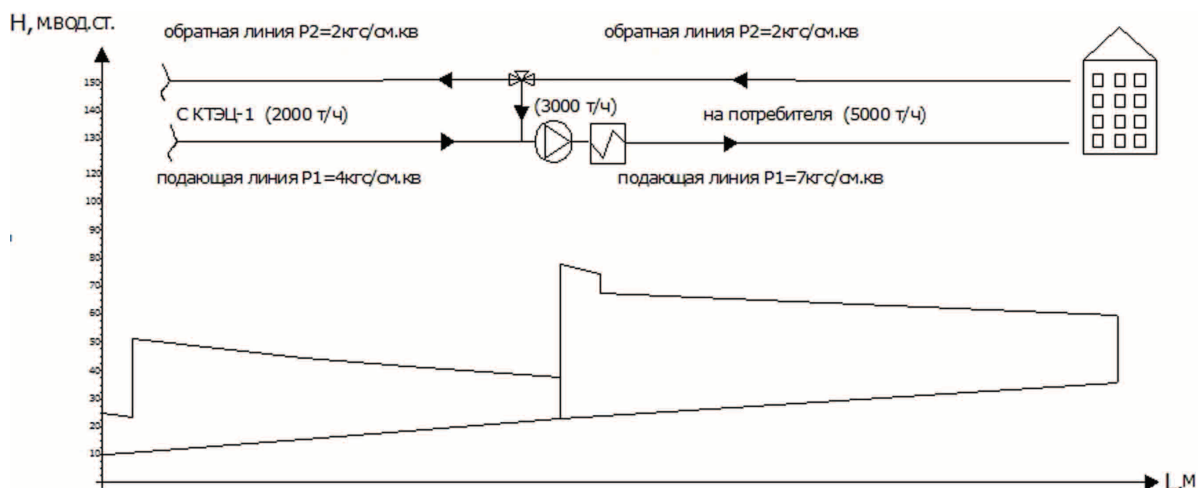


Рис. 5. Пьезометрический график работы теплосети с учетом изменений в тепловой схеме в отопительный период

Fig. 5. The piezometer chart of work of a heating system taking into account changes in the thermal scheme during the heating period

С учетом изменения отпуска тепла после перераспределения между ТЭЦ и котельной и изменений в тепловой схеме (рис. 3) был проведен расчет гидравлического режима работы тепловой сети. Результаты изменения гидравлического режима работы тепловой сети в отопительный период приведены на пьезометрическом графике (рис. 5).

По результатам расчета был построен новый график отпуска тепла при совместной работе источников теплоснабжения [16] с характерными температурами наружного воздуха (рис. 6).

Для оценки экономичности загрузки тепловых источников в расчетах среднемесячная электрическая мощность станции принималась постоянной, а отпуск тепла с горячей водой увеличивался или уменьшался, соответственно, между ТЭЦ и котельной. При этом критерием оценки экономичности загрузки станций являлся суммарный расход топлива, зат-

раченного на отпуск тепловой и электрической энергии по станции, и расход топлива на котельной [17].

Экономия топлива за счет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, по сравнению с вариантом, при котором электрическая энергия вырабатывается на конденсационных электростанциях (КЭС), а тепловая отпускается от котельных, определяется соотношением

$$V_{\text{эк}} = (V_{\text{КЭС}} + V_{\text{кот}}) - V_{\text{ТЭЦ}},$$

где  $V_{\text{КЭС}}$  – расход топлива на КЭС, кг/год;  $V_{\text{кот}}$  – расход топлива на котельной, кг/год;  $V_{\text{ТЭЦ}}$  – расход топлива на ТЭЦ для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, кг/год [18].

Как известно, расход топлива для отпуска одинакового количества тепловой энергии от котельных значительно выше по сравнению с ТЭЦ ( $V_{\text{кот}} > V_{\text{ТЭЦ}}$ ).

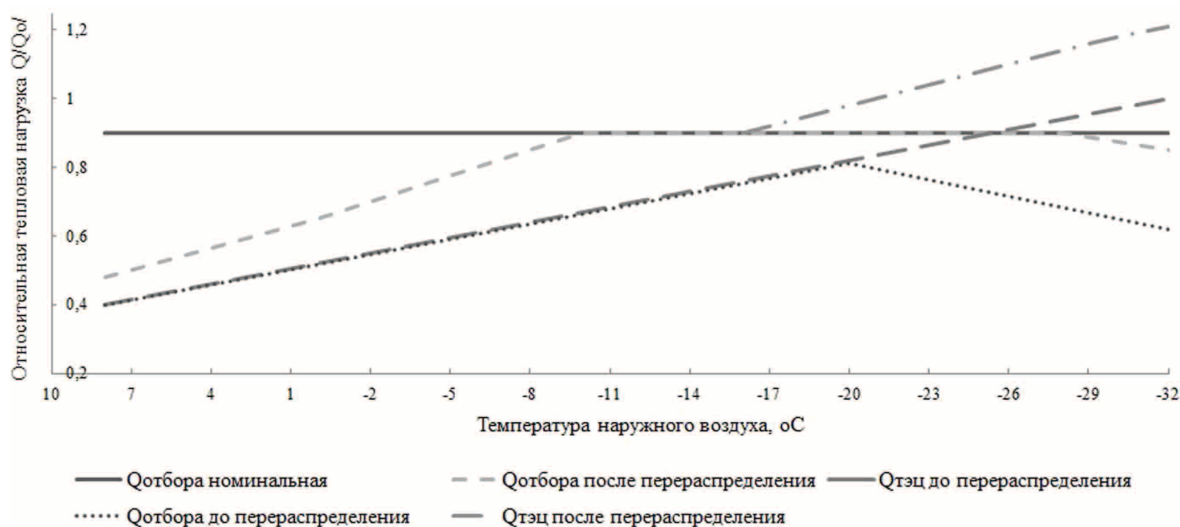


Рис. 6. График отпуска тепла при совместной работе котельной и ТЭЦ

Fig. 6. The heat supply schedule when a boiler room works in collaboration with a combined heat and power plant

Экономия топлива за счет комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, по сравнению с раздельным вариантом, определяется по формуле Л.А. Мелентьева [19] с учетом разного расхода топлива на ТЭЦ и в котельных, кг/год.

$$B_{\text{эк}} = \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}} (\psi b_{\text{КЭС}} - b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.т.}}) - \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к}} (b_{\text{кот}}^{\text{э.т.}} - \psi b_{\text{КЭС}}) + Q_{\text{отб}}^{\text{тур}} (b_{\text{кот}}^{\text{т}} - b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}}) + Q_{\text{п.к.}} (b_{\text{кот}}^{\text{т}} - b_{\text{п.к.}}^{\text{т}}), \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}}$  – количество электроэнергии, выработанной на ТЭЦ комбинированным способом, кВт·ч/год;  $\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к}}$  – количество электроэнергии, выработанной на ТЭЦ конденсационным способом, кВт·ч/год;  $Q_{\text{отб}}^{\text{тур}}$  – количество теплоты, отпускаемой из отборов турбин ТЭЦ внешним потребителям, кВт/год;  $Q_{\text{п.к.}}$  – количество теплоты, отпускаемой от пиковых котлов, кВт/год;  $\psi$  – коэффициент приведения, учитывающий разный отпуск электрической энергии от ТЭЦ и КЭС, изменение потерь электроэнергии в транспортирующих сетях, расхода электроэнергии на собственные нужды станции и другие факторы;  $b_{\text{КЭС}}$  – удельный расход топлива для выработки электроэнергии на КЭС, кг/(кВт·ч);  $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.т.}}$  – удельный расход топлива для выработки электроэнергии на ТЭЦ комбинированным способом, кг/(кВт·ч);  $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.к.}}$  – удельный расход топлива для выработки электроэнергии на ТЭЦ конденсационным способом, кг/(кВт·ч);  $b_{\text{кот}}^{\text{э.т.}}$  – удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии, производимый на замещающей котельной, кг/(кВт·ч);  $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}}$  – удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии на ТЭЦ комбинированным способом, кг/(кВт·ч);  $b_{\text{п.к.}}^{\text{т}}$  – удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии от пиковых источников теплоты, установленных на ТЭЦ, кг/(кВт·ч).

Из выражения (3) следует, что при достижении равенства отпуска тепловой и электрической энергии при раздельном и комбинированном способах производства основными показателями, влияющими на экономию, являются удельные расходы топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков И.А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения в России и за рубежом // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 2 (90). URL: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2540](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2540) (дата обращения: 22.05.2015).
2. Ольховский Г.Г. Совершенствование технологий комбинированной выработки электроэнергии и тепла на ТЭЦ России // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 10. – URL: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=866](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=866) (дата обращения: 20.05.2015).
3. Митюшин В.С., Моисеева Л.Н., Петреня Ю.К. Развитие электроэнергетики России на долгосрочную перспективу и новые задачи энергетического машиностроения // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 4–6.
4. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции / под ред. В.Я. Гиршфельда. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
5. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.

#### Заключение

Анализ результатов расчета показал, что при перераспределении части нагрузки (в среднем 62 Гкал/ч) с котельной на ТЭЦ экономия топлива за отопительный период за счет разницы удельных расходов топлива на отпуск тепловой энергии составит порядка 20 тыс. т у. т. Также при увеличении тепловой нагрузки на ТЭЦ увеличивается теплофикационная выработка, что в итоге тоже приводит к экономии топлива на отпуск электрической энергии. С учетом этого экономия топлива за отопительный сезон достигает порядка 36–38 тыс. т у. т., что при стоимости 1 т у. т. в 2,5 тыс. руб (без учета стоимости транспортировки топлива) в денежном выражении составляет порядка 90 млн руб. в год.

За летний период при использовании котельной как повысительной насосной ТЭЦ может дополнительно отдавать 27,5 Гкал/ч. При этом за летний период экономия составляет около 7 тыс. т у. т. В денежном выражении – порядка 17 млн руб.

Мероприятия по оптимизации тепловых схем источников теплоснабжения позволяют создавать наиболее эффективные режимы совместной работы районных котельных и ТЭЦ.

Полученные результаты могут быть направлены на увеличение эффекта от энергосберегающих мероприятий и использованы для оптимизации работы системы теплоснабжения, запитанной одновременно от нескольких источников тепловой энергии, действующих в границе крупного района города.

В заключение хотим отметить, что решения, принимаемые по объединению систем теплоснабжения с различными источниками, могут привести к существенным изменениям структуры самих источников. Выбор того или иного решения требует проведения технико-экономических и оптимизационных расчетов [20].

6. Чистович А. Как согреть города // Российское Экспертное обозрение. – 2006. – № 2. URL: <http://www.protown.ru/information/articles/3325.html> (дата обращения: 15.05.2015).
7. Теплоснабжение крупного города от загородной ТЭС / Б.Е. Кореннов, И.А. Смирнов, Л.П. Иголка, Н.И. Мамонов // Теплоэнергетика. – 1992. – № 11. – С. 8–10.
8. Hegner H.D., Vogler I. Energie in sparv erodnung EnEV-für die praxis kommentiert: wärmeschutz und energie bilanzen für neubau und bestand. Rechenverfahren, beispiele und auslegungenfür die baupraxis // Ernst&SohnVerlagfür Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. – KG.Berlin, 2002. – 153 p.
9. Шейн И.С., Извеков А.В. Некоторые вопросы оптимизации функционирования городского теплового узла // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVI Междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – Т. 3. – С. 142–143.
10. Звонарева Ю.Н. Оптимизация режимов совместной работы двух источников тепла для улучшения экономических показателей // Техника и технология: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (25.02.2014). – М.: Изд-во «Спутник+»,



2014. – С. 114–117.
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательский дом МЭИ, 2001. – 472 с.
  12. Шейн И.С., Извеков А.В. Совместная работа двух источников теплоснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 2 (17). – С. 34–36.
  13. Сазанов Б.В. Тепловые электрические станции. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
  14. Звонарева Ю.Н. Анализ эффективности перераспределения тепловых нагрузок между несколькими источниками теплоснабжения при различных режимах отпуска тепла // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды XVIII Ежегодной Международной научно-технической конференции. – М., 2012. – С. 41–43.
  15. Мелентьев Л.А. Основные вопросы промышленной теплоэнергетики. – М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1954. – 427 с.
  16. Allen B., Savard-Goguen M., Gosselin L. Optimizing heat exchanger networks with genetic algorithms for designing each heat exchanger including condensers // Applied Thermal Engineering. – 2009. – № 29. – P. 3437–3444.
  17. Смирнов Д.К., Галашов Н.Н. Программный комплекс визуального моделирования схем теплоэнергетических установок // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 36–40.
  18. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.
  19. Мелентьев Л.А. Научные основы теплофикации и энергоснабжения городов и промышленных предприятий: избранные труды / Отделение физико-технических проблем энергетики Рос. акад. наук. – М.: Наука, 1993. – 363 с.
  20. Волосатова Т.А. Некоторые вопросы энергоэффективности тепловых сетей в разрезе текущего состояния комплекса ЖКХ России // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2054> (дата обращения: 12.05.2015).

Дата поступления: 6.11.2015.

UDC 620.92

## ENERGY SAVING IN SYSTEMS OF HEAT SUPPLY OF THE LARGE MUNICIPAL ASSOCIATIONS POWERED FROM SEVERAL SOURCES OF HEAT

**Yuliya N. Zvonareva,**

Kazan State Power University, 51, Krasnoselskaya Street,  
Kazan, 420066, Russia. E-mail: Skulinaun@mail.ru

**Yuriy V. Vankov,**

Kazan State Power University, 51, Krasnoselskaya Street,  
Kazan, 420066, Russia. E-mail: Yvankov@mail.ru

*The relevance of work consists in collaboration modes optimization of two and more sources of thermal energy of the large cities operating at the borders and municipal associations for receiving the most power effective result.*

**Research objective.** *The solution of the existing problems of thermal sources (regional boiler rooms and combined heat and power plants) connected with the way of heat generation, the search of optimization options of thermal schemes in particular and systems of heat supply in general at the borders of the cities, and also the improvement of economic indicators of work of thermal networks and thermal sources for heat supply quality improvement and power efficiency increase.*

**Research methods.** *Modeling heat supply modes by means of the electronic model created on the basis of Zulu for the possibility assessment of optimum water redistribution between combined heat and power plants and a regional boiler room, taking into account technical and economic indicators.*

**Results.** *The analysis of the actual and perspective technical and economic indicators of collaboration of combined heat and power plants and a regional boiler room of large municipal association is carried out, the reserve of thermal power of combined heat and power plants is defined, the options of the most effective use of thermal schemes of sources both in heating and during not heating period are offered, the economy of fuel for the considered system of heat supply is calculated.*

**Conclusions.** *Actions for optimization of thermal schemes of the considered sources of heat supply allow to create the most effective modes of collaboration of regional boiler rooms and combined heat and power plants. Use of the received results is directed on energy saving and optimum work of the system of heat supply powered at the same time from several sources of thermal energy operating at the borders of a large city or municipal association.*

### **Key words:**

*System of heat supply, optimization, heating selection, loading of a heat source, economy of fuel.*

## REFERENCES

1. Bashmakov I.A. Analiz osnovnykh tendentsiy razvitiya sistem teplosnabzheniya v Rossii i za rubezhom [The analysis of the main tendencies of development of systems of heat supply in Russia and abroad]. *News of Heat Supply*, 2008, no. 2 (90). Available at: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=2540](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2540) (accessed 22 May 2015).
2. Olkhovskiy G.G. Sovershenstvovanie tekhnologii kombinirovannoy vyrabotki elektroenergii i tepla na TETS Rossii [Improvement of technologies of the combined power generation and heat at combined heat and power plant of Russia]. *News of Heat Supply*, 2003, no. 10. Available at: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=866](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=866) (accessed 20 May 2015).
3. Mityushin V.S., Moiseeva L.N., Petrenya Yu.K. Razvitie elektroenergetiki Rossii na dolgosrochnuyu perspektivu i novye zadachi energeticheskogo mashinostroeniya [Development of power industry of Russia on a long-term outlook and new problems of mechanical engineering]. *Thermal Engineering*, 2008, no. 1, pp. 4–6.
4. Ryzhkin V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 328 p.
5. Manyuk V.I., Kaplinskiy JA.I., Khizh E.B., Manyuk A.I., Ilin V.K. *Naladka i ekspluatatsiya vodyanykh teplovykh setey* [Adjustment and operation of water thermal networks]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 432 p.
6. Chistovich A. Kak sogret goroda [How to warm the cities]. *Rossiyskoe Ekspertnoe Obozrenie*, 2006, no. 2. Available at: <http://www.protown.ru/information/articles/3325.html> (accessed 15 May 2015).
7. Korennov B.E., Smirnov I.A., Igolka L.P., Mamontov N.I. Teplosnabzhenie krupnogo goroda ot zagorodnoy TETS [Heat supply of the large city from country thermal power plant]. *Thermal Engineering*, 1992, no. 11, pp. 8–10.
8. Hegner H.D., Vogler I. *Energie in sparv eror dnung EnEV-für die praxis kommentiert: wärmeschutz und energie bilanzen für neubau und bestand. Rechenverfahren, beispiele und auslegungen für die baupraxis*. Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. Berlin, 2002. 153 p.
9. Shein I.S., Izvekov A.V. Nekotorye voprosy optimizatsii funktsionirovaniya gorodskogo teplovogo uzla [Some questions of optimization of functioning of city thermal knot]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika»* [Proc. 16<sup>th</sup> Int. Scien. and Technic. Conf. of students and graduate students. Radio electronics, electrical equipment and power]. Moscow, 2010. pp. 30–34.
10. Zvonareva Yu.N. Optimizatsiya rezhimov sovmestnoy raboty dvukh istochnikov tepla dlya uluchsheniya ekonomicheskikh pokazateley [Optimization of the modes of collaboration of two sources of heat for improvement of economic indicators]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnika i tekhnologiya»* [Proc. 12<sup>th</sup> Int. Scien. and Prac. Conf. Equipment and technology]. Moscow, 2014. pp. 114–117.
11. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [Central heating and thermal networks]. Moscow, MEI Publ. house, 2001. 472 p.
12. Shein I.S., Izvekov A.V. Sovmestnaya rabota dvukh istochnikov teplosnabzheniya [Collaboration of two sources of heat supply]. *Reliability and Safety of Power*, 2012, no. 2 (17), pp. 34–36.
13. Sazanov B.V. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 224 p.
14. Zvonareva Yu.N. Analiz effektivnosti pereraspredeleniya teplovykh nagruzok mezhdru neskol'kimi istochnikami teplosnabzheniya pri razlichnykh rezhimakh otpuska tepla [The analysis of efficiency of redistribution of thermal loadings between several sources of heat supply at various modes of holiday heat]. *Trudy XVI-II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika»* [Proc. 18<sup>th</sup> Int. Scien. and Prac. Conf. Radio electronics. Electrician and Power Engineering Specialist]. Moscow, 2012. pp. 41–43.
15. Melentev L.A. *Osnovnye voprosy promyshlennoy teploenergetiki* [Main questions of industrial power system]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1954. 427 p.
16. Allen B., Savard-Goguen M., Gosselin L. Optimizing heat exchanger networks with genetic algorithms for designing each heat exchanger including condensers. *Applied Thermal Engineering*, 2009, no. 29, pp. 3437–3444.
17. Smirnov D.K., Galashov N.N. Programmnyy kompleks vizual'nogo modelirovaniya skhem teploenergeticheskikh ustanovok [Program complex of visual modeling of schemes of heat power installations]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 36–40.
18. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov i ikh otboru dlya finansirovaniya* [Methodical recommendations on the assessment of efficiency of investment projects and their selection for financing]. Moscow, Ekonomika Publ., 2000. 421 p.
19. Melentev L.A. *Nauchnye osnovy teplofikatsii i energosnabzheniya gorodov i promyshlennykh predpriyatii* [Scientific bases of central heating and power supply of the cities and industrial enterprises]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 363 p.
20. Volosatova T.A. Nekotorye voprosy energoeffektivnosti teplovykh setey v razreze tekushchego sostoyaniya kompleksa ZhKKh Rossii [Some questions of energy efficiency of thermal networks in a section of current state of the housing and communal services complex of Russia]. *In?ernyy vestnik Dona*, 2013, no 4. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2054](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2054) (accessed 12 May 2015).

Received: 6 November 2015.

УДК 621.3.048.3

## ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ В МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ЕЕ СТОЙКОСТЬ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ, ХАРАКТЕРНЫМ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

**Дудкин Анатолий Николаевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов  
и материалов Энергетического института Национального  
исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: dan@tpu.ru

**Леонов Андрей Петрович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов  
и материалов Энергетического института Национального  
исследовательского Томского политехнического университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: leonov\_ar@tpu.ru

**Супуева Аделя Сагынбековна,**

инженер кафедры электротехнических комплексов и материалов  
Энергетического института Национального исследовательского Томского  
политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
E-mail: supu\_as@mail.ru

**Актуальность работы** определяется необходимостью изучения заживаемости пропиткой сквозных повреждений в межвитковой изоляции низковольтных обмоток частотно-регулируемых электроприводов.

**Цель работы.** Исследовать влияние электротепловых нагрузок, возникающих при энергоэффективных способах управления электроприводом, на среднее время до пробоя элементов витковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин.

**Метод исследования.** Испытания на физических образцах низковольтной межвитковой изоляции обмоток частотно-регулируемого привода.

**Результаты.** Применение энергоэффективных систем управления электрическим приводом, построенным на базе широтно-импульсной модуляции, резко повысило уровень эксплуатационных электрических нагрузок. Преобладающим для подобных систем стал электротепловой характер старения изоляции. В этом случае особое внимание следует уделить дефектности изоляции обмоточных проводов. В работе проведено определение среднего времени до пробоя скруток с искусственно нанесенными дефектами при действии температуры и высокочастотного модулированного напряжения. Испытания проводились на материалах короностойкого исполнения: провод ПЭТДЭК-180 и пропиточный лак КО-916К. Отмечено, что наличие дефектов даже на одном витке приводит к значительному снижению среднего времени до пробоя системы «пропиточный состав – эмалевая изоляция». Для ряда случаев установлено: межвитковое замыкание возможно на расстояниях, превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации. При жесточенных электротепловых нагрузках на изоляцию обмоток, характерных для широтно-импульсной модуляции, пропитка может не обеспечить необходимого «залечивания» сквозных повреждений в эмалевой изоляции. Рекомендуется для обмоток современных частотно-регулируемых приводов применять только короностойкие электроизоляционные материалы, прежде всего обмоточные провода с минимальной дефектностью изоляции.

### **Ключевые слова:**

Межвитковая изоляция, низковольтная обмотка, сквозные дефекты, пропитка, частотно-регулируемый привод, широтно-импульсная модуляция, коронные разряды, «залечивание» дефектов.

### **Анализ проблемы**

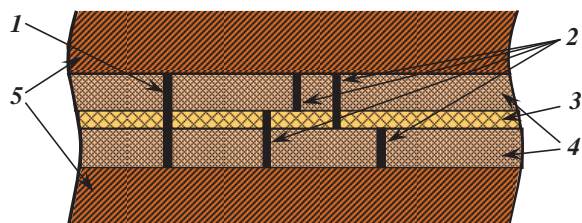
Опыт эксплуатации и многочисленные исследования не оставляют сомнений в том, что самым слабым с точки зрения надежности элементом низковольтной электрической машины является система изоляции [1–4]. В подавляющем большинстве случаев отказы происходят из-за повреждения обмотки, или, точнее, её межвитковой изоляции [4–6]. Критерием отказа является наличие сквозных дефектов в изоляции, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания. При всех прочих равных условиях вероятность отказа изоляции будет тем выше, чем больше число повреждений.

Для количественной оценки поврежденности изоляции принято использовать дефектность  $\lambda$  [1/мм; 1/мм<sup>2</sup>], которая определяет количество дефектов на единицу длины или площади обмоточного провода. Сквозные дефекты могут существовать в изоляции обмоточных проводов в состоянии поставки (дефектность в состоянии поставки  $\lambda_{\text{п}}$ ), возникнуть в процессе производства (технологическая дефектность  $\lambda_{\text{т}}$ ) и эксплуатации электродвигателей (эксплуатационная дефектность  $\lambda_{\text{э}}$ ) [3–5]. Общая дефектность  $\lambda$  за весь период жизни электрической машины будет определяться как сумма:

$$\lambda = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{т}} + \lambda_{\text{э}}.$$

Считается, что дефекты в состоянии поставки и наносимые в процессе производства обмоток должны «залечиваться» (скрываться) при качественной пропитке [1, 3, 7, 8]. В этом случае восстанавливается электрическая прочность поврежденного участка изоляции и обеспечивается необходимая стойкость к эксплуатационным воздействиям. Поэтому очень важно обеспечить максимально полное «залечивание» подобных дефектов пропиточным составом.

Исследование скрытия дефектов при пропитке выявило: «залечиваемость» сквозных повреждений зависит от их вида (точечные, кольцевые, протяженные) и расположения в реальной обмотке [3, 7]. Различают зависимые и независимые дефекты в межвитковой изоляции. Опасными считаются зависимые – дефекты, прорастающие одновременно в композиции «изоляция провода – пропиточный состав – изоляция провода» (рис. 1). Независимые – дефекты, прорастающие в изоляции только одного из соприкасающихся проводников либо при старении в композиции «эмаль – пропиточный состав». Такие дефекты, как правило, не приводят к преждевременному отказу обмоток, так как пробивное напряжение даже состаренной низковольтной изоляции превышает величины рабочих напряжений и перенапряжений.



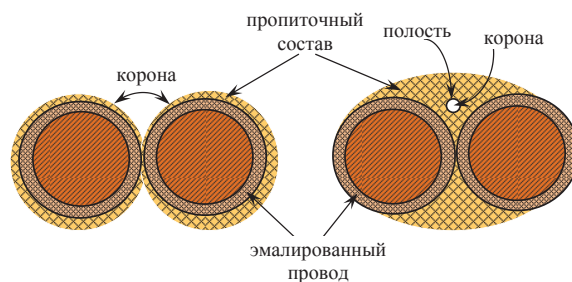
**Рис. 1.** Возможные дефекты в системе межвитковой изоляции: 1 – дефект зависимый; 2 – дефекты независимые; 3 – пропиточный состав; 4 – изоляция провода; 5 – медь провода

**Fig. 1.** The possible defects in the interturn insulation: 1 – dependent defect; 2 – independent defects; 3 – impregnating composition; 4 – wire insulation; 5 – copper wire

Опасными также считаются близко расположенные повреждения, которые лежат на смежных, плотно касающихся витках обмотки. В этом случае вероятно возникновение короткого замыкания, связанного с действием искровых разрядов во время коммутаций.

До недавнего времени основным эксплуатационным воздействием, вызывающим ухудшение свойств низковольтной изоляции, являлась температура [6, 9]. Длительный нагрев в процессе эксплуатации электрической машины неизбежно сопровождается тепловым старением системы изоляции ее обмотки. Действие электрического поля считалось пренебрежительно малым, т. к. величины воздействующих напряжений и перенапряжений были значительно меньше пробивного напряжения даже состаренной изоляции, а также ниже напряжения начала ионизации. После внедрения

энергоэффективных способов регулирования скоростей вращения электроприводов, построенных на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменились характер и величины электрических перенапряжений в низковольтных обмотках [1, 10–13, 15, 16]. В этом случае стал преобладать электротепловой характер старения под действием импульсов электрических перенапряжений, создаваемых источником напряжения преобразователя широтно-импульсной модуляции.



**Рис. 2.** Место возникновения коронных разрядов между витками низковольтной обмотки в частотно-регулируемом приводе

**Fig. 2.** The place of corona discharges emergence between the turns of the low-voltage winding in variable-frequency drive

Повышенные электрические нагрузки в порах, воздушных зазорах межвитковой изоляции и на лобовых частях обмотки приводят к появлению коронных разрядов (или частичных), накапливанию объемных зарядов и возникновению локальных перегревов (рис. 2) [11, 12]. В ряде случаев отмечено значительное ускорение процессов старения изоляции и резкое снижение ее среднего срока службы [14–20]. Несмотря на накопленный опыт, в настоящее время недостаточно информации о том, как сказывается наличие дефектов на развитие процессов пробоя и отказа низковольтной межвитковой изоляции. В связи с этим актуальным становится вопрос: насколько эффективно будет «залечивание» сквозных повреждений после пропитки с учетом новых условий эксплуатации?

#### Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны обмоточный провод ПЭТД2-К-180 и пропиточный лак КО-916К.

ПЭТД2-К-180 – единственный в настоящее время эмалированный провод короностойкого исполнения отечественного производства, сравнительно недавно разработанный и выпускаемый в РФ и рекомендованный для применения в обмотках частотно-регулируемых электроприводов. Конструкция данного провода содержит токопроводящую жилу, покрытую двухслойной изоляцией. Внутренний слой выполнен из тригидроксизтилциануратного лака, содержащего не менее 0,1 об. % наночастиц оксида кремния, а внешний слой – из полиамидимидного лака [21, 22].

Кремнийорганический электроизоляционный лак КО-916К имеет высокие диэлектрические ха-

рактеристики и короностойкость и применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов, в том числе высоковольтных обмоток.

### Конструкция образца

Образцы представляли собой скрутки из короностойкого провода ПЭТД 2К-180 с рабочей зоной 125 мм, выполненные согласно ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008 [23]. Испытывались бездефектные скрутки и с искусственно нанесенными на изоляцию дефектами. Наносились дефекты двух типов: кольцевые (в виде кольцевого пореза эмаливой изоляции до жилы провода) и протяженные (удаление изоляции лезвием на участке, протяженностью 1 мм). Образцы с искусственно нанесенными дефектами были подготовлены в следующих состояниях: с дефектом на одном витке, с дефектами на соседних витках при расстояниях между дефектами 0, 10 и 20 мм (рис. 3).

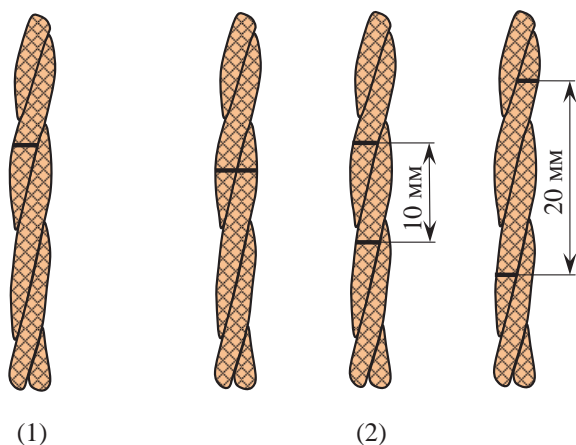


Рис. 3. Макетные образцы скруток обмоточного провода с кольцевым дефектом: 1 – на одном витке; 2 – на обоих витках с различным расстоянием между дефектами

Fig. 3. The prototype samples of winding wire twists with a ring defect: 1 – on one turn; 2 – on both windings with different distances between the defects

С целью отбора бездефектных образцов перед высокочастотными испытаниями каждая скрутка испытывалась повышенным испытательным напряжением, определенным в соответствии с [9]:

$$U_{\text{исп}} = \bar{U}_{\text{ср.д}} + 3\sigma,$$

где  $\bar{U}_{\text{ср.д}}$  и  $3\sigma$  – среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения дефектных образцов.

Скрутки двукратно пропитывались короностойким лаком КО-916К методом погружения. После каждой пропитки образцы подвергались ступенчатой сушке в соответствии с нормативно-технической документацией на лак.

### Методика испытаний

При проведении испытаний за основу принята методика [11], позволяющая оценить среднее время до пробоя скруток при воздействии эксплуата-

ционных нагрузок, характерных для обмоток ЧРП на базе ШИМ. Общая схема проведения испытаний приведена на рис. 4.

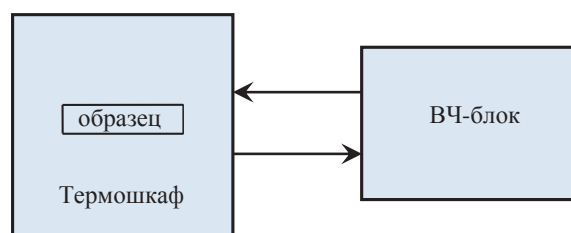


Рис. 4. Схема проведения испытаний на короностойкость систем «пропиточный состав – эмалированный провод»

Fig. 4. The scheme of tests on corona resistance of systems «varnish – enamel wire»

Испытуемые образцы помещались в термошкаф, нагретый до температуры, соответствующей классу нагревостойкости провода (180 °С). После этого образец испытывался высокочастотным модулированным напряжением со следующими характеристиками: напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В с частотой 400 Гц, частота квантования (модуляции) напряжения 5 кГц с крутизной нарастания переднего фронта (длительность фронта волны) 4 мкс. В этих условиях по всей рабочей поверхности скрутки возникал непрерывный коронный разряд, который в сочетании с температурой адекватно воспроизводил основные эксплуатационные воздействия на межвитковую изоляцию [11]. Среднее время до пробоя фиксировалось с помощью электронного секундомера. За результат при каждом испытании принято среднее арифметическое значение времени до пробоя 50 образцов.

### Результаты испытаний

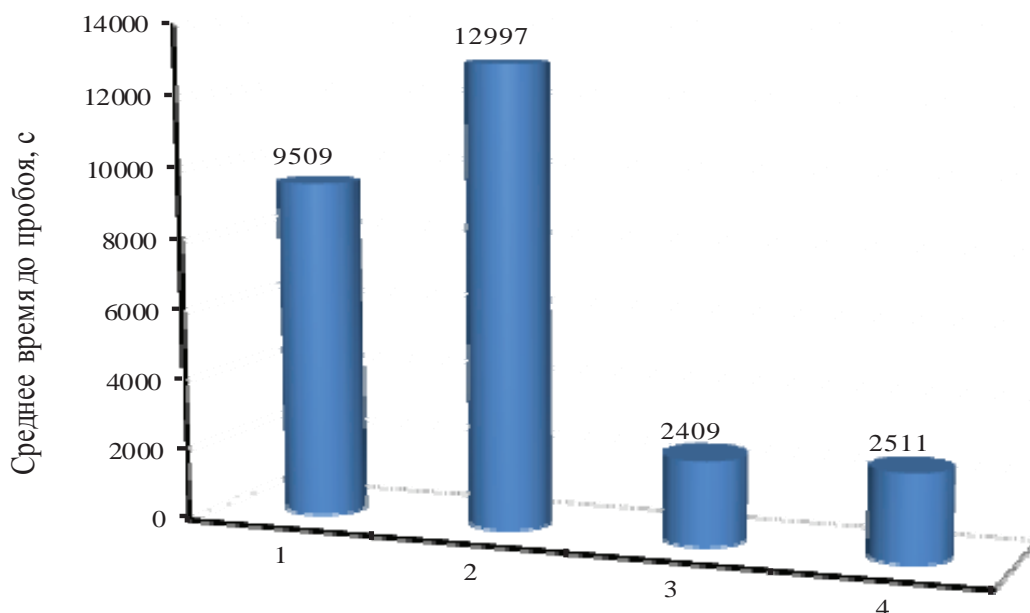
Результаты определения среднего времени до пробоя приведены на рис. 5, 6.

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы, отражающие особенности влияния электротепловых нагрузок, характерных для энергоэффективных приводов, на изоляцию обмоток.

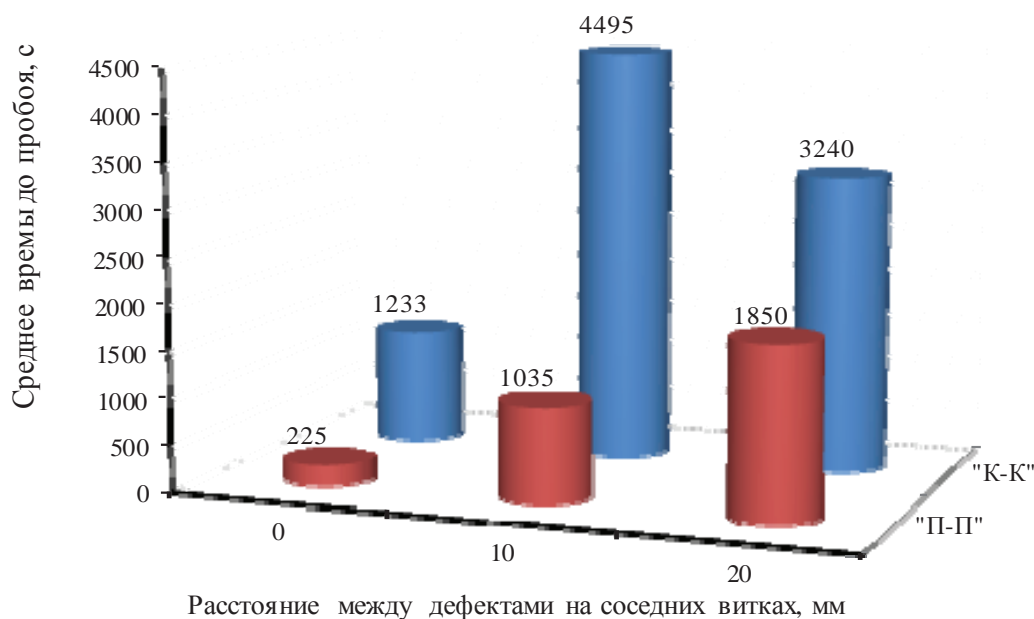
Выявлено, что наличие сквозных дефектов в эмаливой изоляции, даже на одном витке, ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя. Коронные разряды, возникающие под действием перенапряжений в местах независимых дефектов, приводят к ускоренному разрушению неповрежденной эмаливой изоляции на втором витке (рис. 7). Пробой изоляции в месте дефекта происходит практически на всех образцах (рис. 8).

Отмечено: межвитковое замыкание возможно на расстояниях, превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации низковольтных электрических машин.



**Рис. 5.** Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-К-180 при испытаниях ВЧ-модулированным сигналом: 1 – непропитанные образцы; 2 – образцы, пропитанные лаком КО-916К; 3 – непропитанные образцы с кольцевым дефектом на одном витке; 4 – образцы пропитанные лаком КО-916К с кольцевым дефектом на одном витке

**Fig. 5.** The mean time to the breakdown of wire twists PETD2-K-180 when tested by HF modulated signal: 1 – unimpregnated samples; 2 – samples impregnated with varnish KO-916K; 3 – unimpregnated samples with the ring defect on one turn; 4 – samples impregnated with varnish KO-916K with the ring defect on one turn



**Рис. 6.** Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-К-180, пропитанных лаком КО-916К, при различных типах дефектов на соседних витках: «К-К» – «кольцевой-кольцевой»; «П-П» – «протяженный-протяженный»

**Fig. 6.** The mean time to breakdown of wire twists PETD2-K-180 impregnated with varnish KO-916K for different types of defects on the adjacent turns: «R-R» – «ring-ring»; «E-E» – «elongated-elongated»

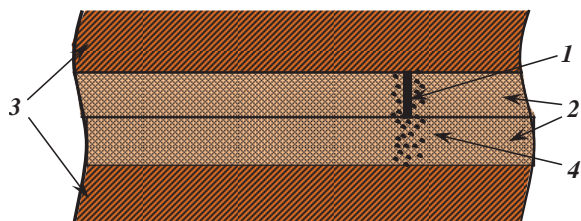
Как известно, величина пробивного напряжения для низковольтной однослойной изоляции подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $U_d$  и  $\sigma_d$ . При наличии сквозных дефектов происходит пробой воздушного промежутка, напряжение пробоя которого также подчиняется нормальному закону.

Величины  $U_d$  и  $\sigma_d$  могут быть определены по эмпирическим формулам [4]:

$$U_{z_i} = 0,12 + 1,9z_i - 0,16z_i^2 - 0,032\theta_{II} + 0,024\phi_{II}^2 - 0,00021\phi_{II}^2 - \sqrt{2} \cdot 0,018 \cdot z_i \cdot (101,3 - P), \quad (1)$$

$$\sigma_{z_i} = 0,247 + 0,1 \cdot z_i - \sqrt{2} \cdot 0,00242 \cdot z_i \cdot (101,3 - P), \quad (2)$$

где  $z_i$  – максимальное расстояние между дефектами, мм;  $\varphi_n$  – относительная влажность воздуха (табличное значение), %;  $\theta_n$  – температура воздуха в полости двигателя, берется в зависимости от температуры окружающей среды, °C;  $P$  – относительная плотность воздуха, 60 кПа.



**Рис. 7.** Физическая модель отказа элемента низковольтной межвитковой изоляции в обмотке ЧРП: 1 – независимый дефект; 2 – изоляция провода; 3 – медь провода; 4 – появление коронных разрядов в месте дефекта и пробой изоляции

**Fig. 7.** The physical model of low-voltage interturn insulation element failure in the winding VFD: 1 – independent defect; 2 – wire insulation; 3 – copper wire; 4 – emergence of corona discharges at the site of the defect and insulation breakdown



**Рис. 8.** Характерный вид места пробоя изоляции макетного образца в месте дефекта

**Fig. 8.** The typical image of the place of insulation breakdown of the model sample at the site of the defect

Максимально возможный воздушный промежуток  $Z_{\max}$  (рис. 9) между сквозными повреждениями, лежащими на смежных витках, который следует учитывать как место для развития короткого замыкания, определяется как

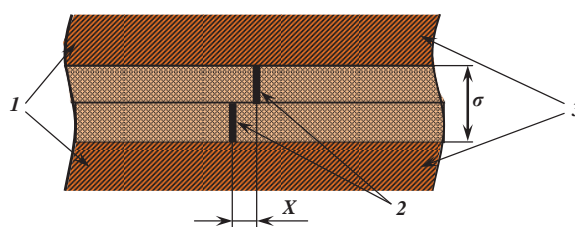
$$Z_{\max} = X + \sigma. \quad (3)$$

Как показывает опыт, с учетом выражений (1)–(2), конструктивных параметров обмотки, величин рабочих напряжений и перенапряжений величина  $Z_{\max}$  для низковольтных обмоток двигателей общепромышленного применения, как правило, не превышает нескольких миллиметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufhold M., Bauer K., Schemmel F. Reliability and statistical lifetime – prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – P. 6–13.
2. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского университета, 1990. – 192 с.
3. Кириллов Ю.А. Обеспечение надежности электрической изоляции обмоток асинхронных двигателей на стадии их проектирования и изготовления: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1990. – 233 с.

Результаты испытаний на макетных образцах показали, что перекрытие между дефектами возможно при расстояниях, значительно превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации. Коронные разряды вызывают перекрытия по поверхности изоляции, что способствует образованию короткого замыкания между соседними витками даже при значительной удаленности дефектов друг от друга.



**Рис. 9.** Схема расположения сквозных повреждений на изоляции смежных витков: 1 – изоляция витков ( $\sigma$ ); 2 – сквозное повреждение эмали ( $X$  – расстояние между дефектами); 3 – медь провода

**Fig. 9.** The location scheme of through damages to the insulation of adjacent coils: 1 – winding insulation ( $\sigma$ ); 2 – through damage to the enamel ( $X$  – the distance between the defects); 3 – copper wire

При ужесточенных электротепловых нагрузках на изоляцию обмоток, характерных для ШИМ, пропитка может не обеспечить необходимого «залечивания» сквозных дефектов в эмалистой изоляции.

Практически во всех случаях среднее время до пробоя бездефектных образцов в несколько раз больше, по сравнению с образцами, на которые нанесен хотя бы один дефект (несмотря на двукратную пропитку образцов короностойким пропиточным лаком). Эти результаты характерны для всех типов дефектов на всех образцах, в том числе и для скруток с дефектом на одном витке.

#### Заключение

В завершение следует отметить: для обеспечения требуемого уровня надежности межвитковой изоляции обмоток ЧРП следует применять только короностойкие электроизоляционные материалы, прежде всего обмоточные провода с минимальной дефектностью изоляции.

4. Похолок Ю.П. Надежность изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 1972. – Т. 242. – С. 207–212.
5. Бесперстов П.П. Исследование дефектообразования в изоляции обмоток асинхронных двигателей при их изготовлении: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 179 с.
6. Пыхтин В.В. Процесс образования сквозных дефектов в пленочной полимерной изоляции обмоток асинхронных двигателей при тепловых и механических нагрузках // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 48–52.
7. Галушко А.И., Эгъемез Н.А. Исследование совместности пропиточных материалов с эмалированными проводами в ме-

- стах повреждения эмали // Электротехническая промышленность. – 1983. – № 8 (222). – С. 11–12.
8. Похолков Ю.П., Деревянко В.И. Влияние пропитывающего состава на надежность витковой изоляции асинхронных электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. – 1974. – Т. 282. – С. 61–64.
  9. Куклева Л.Е., Похолков Ю.П., Шамшур В.М. Влияние теплового старения на образование дефектов в изоляции эмаль-проводов // Известия Томского политехнического университета. – 1974. – Т. 282. – С. 52–54.
  10. Белассел М., Беспалов В.Я. Волновые параметры и перенапряжения в различных типах обмоток асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ-преобразователей // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 56–63.
  11. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / Ю.П. Похолков, А.П. Леонов, И.А. Кочетков, А.А. Коробцов, Е.Ю. Солдатенко // Кабели и провода. – 2013. – № 3 (340). – С. 16–18.
  12. Похолков Ю.П., Леонов А.П., Коробцов А.А. Изоляция обмоток низковольтных асинхронных двигателей в условиях применения системы частотного управления // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 52–54.
  13. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – V. 9. – № 4. – P. 22–31.
  14. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4136.
  15. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors / M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck, M. Eberhardt // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – V. 47. – № 2. – P. 396–402.
  16. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – P. 4147–4155.
  17. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–5.
  18. Stone G., Culbert I., Lloyd B. Stator insulation problems associated with low-voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – 2007. – P. 187–192. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4198217> (дата обращения: 11.11.2015).
  19. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
  20. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters / M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – V. 1. – P. 239–246.
  21. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – № 5 (342). – С. 19–23.
  22. Короностойкий обмоточный провод: пат. Рос. Федерация № 80267; заявл. 14.08.2008; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3. – 3 с.
  23. ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2008. – 17 с.

Поступила 12.11.2015.

UDC 621.3.048.3

## THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE WINDING INSULATION RESISTANCE TO OPERATIONAL LOADS INHERENT FOR VARIABLE FREQUENCY DRIVE

**Anatoliy N. Dudkin,**

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

**Andrey P. Leonov,**

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

**Adelya S. Supueva,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: supu\_as@mail.ru

**The relevance of the work** is determined by the need to study the healing impregnated through damages to interturn insulation of low-voltage windings of variable frequency drives.

**The objective of the work:** to investigate the effect of electrothermal stresses arising from variable frequency drive systems on the average time before the breakdown of electric insulation of low-voltage windings of electric machines.

**The method of research:** testing low-voltage interturn insulation of windings of the variable frequency drive (VFD) on physical samples.

**Results.** The authors found out that the use of VFD control systems based on the pulse-width modulation increased the level of operating electrical loads. It was also discovered that the electro-thermal character of insulation aging dominates. In this case, special attention should be paid to the presence of defects in the insulation of the wires. The definition of the average time to breakdown twists with marked defects under the influence of temperature and high-frequency modulated voltage was made in this work. For the tests used the corona resistance materials: wire PETD2K 180 and varnish KO-916K. Even the presence of defects on one turn leads to significant re-



duction of the average time to the breakdown of the system «varnish – winding wire». For a number of cases it was discovered the interturn closure is possible at distances exceeding the limit for normal operating conditions. For more severe electric loads on the winding insulation characteristic of the pulse-width modulation (PWM), the impregnation might not provide the required «healing» through damages in enamel insulation. For windings of modern variable-speed drives it is recommended to use only corona resistant materials, winding wires with minimum insulation defects in particular.

#### Key words:

Interturn insulation, low-voltage winding, winding through defects, impregnation, variable frequency drive, pulse-width modulation, corona discharges, «healing» of defects.

#### REFERENCES

- Kaufhold M., Bauer K., Schemmel F. Reliability and statistical lifetime – prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 6–13.
- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The reliability of the winding insulation of electro-technical articles]. Tomsk, Tomsk university Publ. house, 1990. 192 p.
- Kirillov Yu.A. *Obespechenie nadezhnosti elektricheskoy izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley na stadii ikh proektirovaniya i izgotovleniya*. Dis. Cand. nauk [Ensuring the reliability of the windings electrical insulation of induction motors at the stage of their design and manufacture. Cand. Diss.]. Tomsk, 1990. 233 p.
- Pokholkov Yu.P. *Nadezhnost izolyatsii vsypanykh obmotok asinkhronnykh dvigateley* [Reliability isolation of random-wound windings of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1972, vol. 242, pp. 207–212.
- Besperstov P.P. *Issledovanie defektoobrazovaniya v izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley pri ikh izgotovlenii*. Dis. Cand. nauk [The study of defect in the windings insulation of induction motors in their production. Cand. Diss.]. Tomsk, 1975. 179 p.
- Pykhtin V.V. *Protsess obrazovaniya skvoznykh defektov v ple-nochnoy polimernoy izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley pri teplovykh i mekhanicheskikh nagruzkakh* [Process of formation perforating defects in the film polymer insulation windings of induction motors with the thermal and mechanical loads]. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 48–52.
- Galushko A.I., Etemez N.A. *Issledovanie sovместимости propitochnykh materialov s emalirovannymi provodami v mestakh povrezhdeniya emali* [Studies on compatibility of materials with impregnating insulated wires in the ground damages of the enamel]. *Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost*, 1983, no. 8 (222), pp. 11–12.
- Pokholkov Yu.P., Derevyanko V.I. *Vliyanie propityvayushchego sostava na nadezhnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigateley* [Influence of impregnating composition on the reliability turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1974, vol. 282, pp. 61–64.
- Kukleva L.E., Pokholkov Yu.P., Shamshur V.M. *Vliyanie teplovogo stareniya na ob-razovanie defektov v izolyatsii emal-provodov* [Influence of thermal aging on the formation of defects in the insulation enameled wire]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1974, vol. 282, pp. 52–54.
- Belassel M., Bespalov V.Ya. *Volnovye parametry i perenapryazheniya v razlichnykh tipakh obmotok asinkhronnykh dvigateley, pitaemykh ot ShIM-preobrazovateley* [The wave parameters and surge in various types of windings of induction motors fed by PWM converters]. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 56–63.
- Pokholkov Yu.P., Leonov A.P., Kochetkov I.A., Korobtsov A.A., Soldatenko E.Yu. *Primenenie emalirovannykh provodov v obmotkakh asinkhronnykh dvigateley s chastotnym upravleniem* [The use of enameled wire in the windings of induction motors with frequency control]. *Cables and Wires Magazine Ltd. Co*, 2013, no. 3 (340), pp. 16–18.
- Pokholkov Yu.P., Leonov A.P., Korobtsov A.A. *Izolyatsiya obmotok nizkovoltnykh asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh primeneniya sistemy chastotnogo upravleniya* [Insulation of low-voltage windings of induction motors in the conditions of use of frequency control]. *Electrical Technology Russia*, 2012, no. 6, pp. 52–54.
- Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. *Motor winding problems caused by inverter drives*. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 22–31.
- Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. *A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136.
- Kaufhold M., Auinger H., Berth M., Speck J., Eberhardt M. *Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, vol. 47, no. 2, pp. 396–402.
- Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. *Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, pp. 4147–4155.
- Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. *Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
- Stone G., Culbert I., Lloyd B. *Stator insulation problems associated with low-voltage and medium voltage PWM drives*. *IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, 2007, pp. 187–192. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4198217> (accessed 11 October 2015).
- Bonnett A.H., Soukup G.C. *Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
- Melfi M., Sung A.M.J., Bell S., Skibinski G.L. *Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 1, pp. 239–246.
- Zelenetskiy Yu.A. *O sovershenstvovanii tekhnicheskoy dokumentatsii na emalirovannye provoda* [On the improvement of the technical documentation for enameled wire]. *Cables and Wires Magazine Ltd. Co*, 2013, no. 5 (342), pp. 19–23.
- Andrianov V.K., Peshkov I.B., Meshchanov G.I., Burakov O.B. *Koronostoykiy obmotochnyy provod* [Corona resistant wire]. Patent RF, no. 80267, 2009.
- GOST R MEK 60851.5–2008. Provoda obmotochnyye. Metody ispytaniya izolyatsii napryazheniem* [State Standard 60851.5–2008. Winding wires. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 17 p.

Received: 12 November 2015.

УДК 504.55.054:622(470.6)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

**Голик Владимир Иванович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры технологии разработки месторождений  
Северо-Кавказского государственного технологического университета,  
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: v.i.golik@mail.ru

**Лукьянов Виктор Георгиевич,**

д-р техн. наук, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа  
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, д. 30. E-mail: krets@tpu.ru

**Страданченко Сергей Георгиевич,**

д-р техн. наук, проф., ректор Института сферы обслуживания  
и предпринимательства Донского государственного технического универ-  
ситета, Россия, 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147. E-mail: ssg72@mail.ru

**Масленников Станислав Александрович,**

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой строительства и техно-  
ферной безопасности Института сферы обслуживания и предприниматель-  
ства Донского государственного технического университета, Россия,  
346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью расширения области применения технологии с подземным выщелачиванием металлов в блоках, как условия удовлетворения закономерно возрастающей потребности промышленности в сырье.

**Цель работы:** обоснование технической возможности и экономической целесообразности извлечения металлов из запасов, преимущественно полиметаллических руд, некондиционных для традиционной технологии получения металлов, но пригодных для применения инновационных технологий разработки месторождений.

**Методы исследования:** полупромышленные испытания на рудниках подземной добычи и лабораторные исследования в перколяторах с обработкой данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа с реализацией алгоритмов, интерпретация результатов опытов, достижений практики, патентных данных и публикаций.

**Результаты.** Выявлены новые закономерности технологических процессов извлечения металлов из руд подземным выщелачиванием. Доказано, что комплексное совершенствование технологических процессов системы разработки с подземным выщелачиванием позволяет новой технологии конкурировать с традиционной технологией, особенно в тех случаях, когда методы традиционной технологии ограничиваются возможностями современных технологий переработки металлических руд.

**Выводы.** Технология с подземным выщелачиванием металлов из скальных руд является еще недостаточно используемым резервом увеличения производства металлов, в первую очередь дефицитных и редких, в том числе из некондиционных руд. Результаты полупромышленных исследований технологических процессов подземного выщелачивания и теоретических расчетов обнаруживают достаточную корреляцию практики и теории, что свидетельствует о возможности управления ходом получения металлов с корректировкой технологии в ходе ее освоения. Подземное выщелачивание бедных и забалансовых руд получит развитие по мере исчерпания запасов в удобных для эксплуатации регионах Земли в ближайшей исторической перспективе, как технология, удовлетворяющая одновременно и экономической и экологической компонентам гуманизации горного производства.

### **Ключевые слова:**

Подземное выщелачивание, металл, блок, извлечение, запасы, традиционная технология, исследования, процессы, экология, экономика.

### **Введение**

Одним из новых прогрессивных способов добычи металлов является метод подземного выщелачивания (ПВ) полезных ископаемых на месте их залегания [1]. Вовлечение в отработку месторождений полезных ископаемых, залегающих в сложных горно-геологических условиях или представленных бедными рудами, разработка которых в настоящее время традиционными способами (ТС) нерентабельна, позволяет значительно расширить сырьевую базу промышленности. Несомненными преимуществами метода являются его экономич-

ность, повышенная безопасность работ, сохранность внешней среды.

Метод ПВ позволяет произвести доработку запасов, считавшихся потерянными в охранных целиках, зонах обрушения и т. п. Он служит резервом увеличения выпуска валовой продукции, тем более что его реализация осуществляется без значительных капиталовложений.

За сравнительно короткий срок применения ПВ на скальных месторождениях накоплен опыт отработки как забалансовых, так и балансовых руд. Однако, несмотря на имеющийся опыт, недо-

статочная изученность процесса препятствует широкому внедрению нового метода на скальных месторождениях [2].

Основной задачей развития метода является разработка его научных основ. Главная задача горного производства – извлечение полезного ископаемого из недр с наименьшими для данных условий потерями и разубоживанием.

Системой разработки методом ПВ называется совокупность вскрывающих подготовительных выработок и определенный порядок их проведения и эксплуатации, увязанный во времени и пространстве с управляемым химико-технологическим процессом перевода полезного компонента из руды в раствор.

Исходя из этого, системы ПВ имеют особенности:

- Подготовительно-нарезные работы, кроме разделения месторождения на эксплуатационные блоки, предполагают проходку специальных выработок – оросительных и дренажных.
- Качество дробления руды для ПВ является решающим фактором, от которого зависит полнота и время извлечения полезного компонента из руды и экономическая эффективность технологии. Наиболее благоприятными являются куски руды класса +0–50 мм. Если при ТС габаритные куски могут иметь размер 1000 мм и более, то для ПВ даже количество фракции +200 мм следует сводить к минимуму.

Важной задачей является равномерность уплотнения магазинируемой в блоке руды. При отбойке руды компенсационное пространство формируются за счет частичного выпуска отбитой руды. При этом руда разрыхляется только в пределах эллипсоида, а в остальном объеме остается неподвижной.

При выщелачивании скальных руд распространена инфильтрационная схема движения потока реагента от оросителей к дренажным устройствам под действием гравитации. Раствор не заполняет пустоты между кусками руды, а лишь покрывает их тонкой пленкой, поэтому перспективна схема орошения блоков ПВ с помощью скважин, пробуренных в замагазинированной руде. Сбор растворов осуществляется в нижней части блока.

В процессе извлечения полезного компонента (ПК) из руды спустя время процесс замедляется и возникает необходимость его интенсификации, что достигается воздействием на выщелоченную массу физическими, химическими и биологическими методами, а также их комбинациями.

Особенностями разработки месторождений способом ПВ являются: извлечение полезного компонента из руды на месте залегания, повышенные требования к гранулометрическому составу и равномерности уплотнения руды, проведение специальных выработок; совмещение функций подготовительных выработок, защита внешней среды от утечек растворов; интенсификация процесса.

Эксперименты по исследованию технологии выщелачивания осуществлены на горных предприятиях урановой отрасли в Северном Казахстане и Забайкалье [3, 4].

#### Объекты и методы исследования

Исследование эффективности выщелачивания осуществляется комплексным методом, включающим оценку качества дробления руды и параметров извлечения металлов их руд в ходе инфильтрации выщелачивающих растворов.

Для оценки качества дробления руды применяется метод фотопланиметрии на всех этапах подготовки к выщелачиванию с подсчетом габаритных с точки зрения выщелачивания классов.

После выщелачивания руды для установления полноты выщелачивания по замагазинированной руде проходятся контрольные выработки с отбором проб и лабораторными определениями не извлеченного металла. По разнице исходного и конечного содержания металлов в руде определяется полнота извлечения металлов для каждой фракции руды [5].

Экспериментальный блок отработывали на месторождении, сложенном линзовидным рудным телом неправильной формы, залегающим в рассланцованных осадочных породах крепостью 4–6 по шкале проф. М.М. Протодяконова [6].

Верхняя часть месторождения отработывалась системами с обрушением.

Начальным этапом полупромышленных испытаний было выщелачивание руды забойной крупности, загруженной в восстающий сечением 2×2 м и высотой 37 м. Для контроля за фильтрацией растворов из подэтажных выработок были пройдены сбойки с восстающим. Продукционные растворы собирали в бак с последующей откачкой на переработку. Выщелачивание руды длилось 220 суток.

Параллельно с выщелачиванием руды в восстающем отработывался опытный блок ПВ (рис. 1).

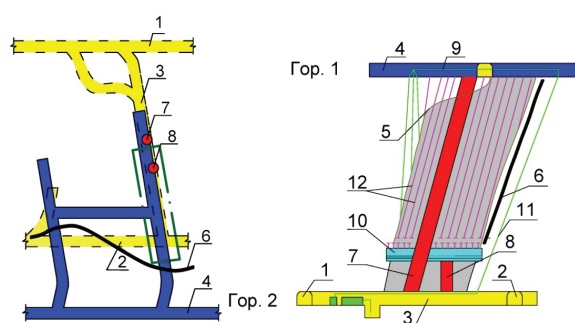


Рис. 1. Подготовка опытного блока: 1, 2 – штреки; 3 – орт А; 4 – орт Б; 5 – граница рудного тела; 6 – разлом; 7 – отрезной восстающий; 8 – дучка; 9 – монтажный слой; 10 – подсечной слой; 11 – скважина для подачи растворов; 12 – взрывные скважины

Fig. 1. Arrangement of the experimental block: 1, 2 are the entries; 3 is the A drift; 4 is the B drift; 5 is the boundary of the ore body; 6 is the fault; 7 is the cut-out raise; 8 is the finger raise; 9 is the assembly layer; 10 is the under-mining layer; 11 is the well for solution feeding; 12 is the blast hole

Нарезные работы в блоке включали формирование монтажного и подсечного слоев, проведение выпускной дучки, отрезного восстающего и отрезной щели. Монтажный слой представлял собой верхнюю подсечку по всей длине блока и предназначался для бурения взрывных скважин и размещения оросительной системы. Подсечной слой был проведен с уклоном 5° к центру блока. Дня гидроизоляции по площади днища блока укладывалась поливинилхлоридная пленка, защищаемая деревянным настилом и рудной подушкой. Параметры блока составили, м: длина 23–27, ширина – 5, высота – 28.

Станком НКР-100М обурено 44 скважины по сетке 1,7×2 м параллельно друг другу с наклоном согласно падению рудного тела с недобуриванием на величину 1,5 м. Заряжание скважин осуществлялось гранулитом АС-0 без забойки. Взрывание осуществлено электрическим способом по встречной схеме, короткозамедленное с интервалом замедления между рядами 25 с. Общий вес заряда составил 4200 кг. Коэффициент разрыхления 1,12.

Выщелачивание продолжалось 6,5 месяцев до снижения концентрации ПК в растворах до уровня, не отвечающего технологическим требованиям. Прекратился расход выщелачивающего реагента.

Для уточнения механизма выщелачивания блок был вскрыт четырьмя выработками сечением 6–8 м<sup>2</sup> с креплением неполными дверными окладами на 4 подэтажах до границ рудного тела (рис. 2).

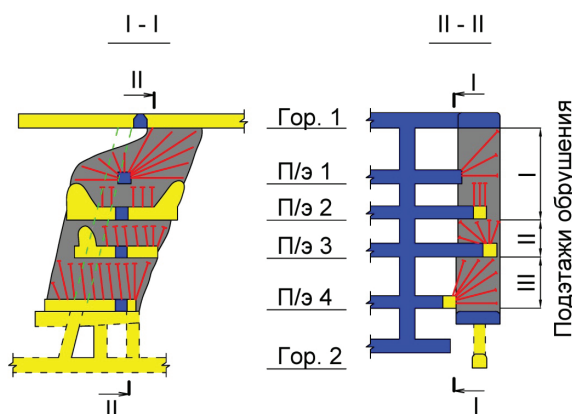


Рис. 2. Подготовка блока к интенсификации процесса выщелачивания

Fig. 2. Block arrangement to intensify leaching

Было установлено: в зоне отрезной щели произошло переуплотнение руды, а в ряде мест крупность руды достигла 1,2 м; дробление массива на мелкие фракции происходило только в зоне, равной 2–3 диаметрам заряда; растворы проникали неравномерно: более интенсивно двигались по трещинам и переизмельченной руде, а также в районе лежащего бока.

Повторное дробление было осуществлено зарядами во взрывных скважинах диаметром 85 и 65 мм с увеличением сетки по отношению к первоначальной в 2 раза. Заряжание скважин произво-

дилось гранулитом АС-4. Боевики из аммонала ВА-8 размещались на забое и в устье скважин, между ними прокладывались 2 нитки детонирующего шнура. На I подэтаже взорвано 35 скважин диаметром 105 мм и 15 скважин диаметром 65 мм. Подэтаж II подвергался дроблению из расчески 3 веерами скважин диаметром 65 мм. Компенсационное пространство было сформировано мелкошпуровым способом в районе отрезной щели. Общее число скважин – 42 (7 вееров по 6 скважин). На подэтаже III повторное дробление произведено с помощью 73 скважин. Общее количество взрывчатых веществ (ВВ) на повторное дробление составило 5120 кг. Удельный расход ВВ на вторичное дробление – 1,55 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент разрыхления – 1,43.

После повторного дробления и встряхивания руды орошение выщелачивающими растворами продолжалось четыре с половиной месяца. Получено количество металлов, составляющее 1,22 количества за период выщелачивания до повторного дробления.

Блок 2 был заложен висячем боку рудной залежи и ограничен по простиранию контурами оруденения другого месторождения (рис. 3).

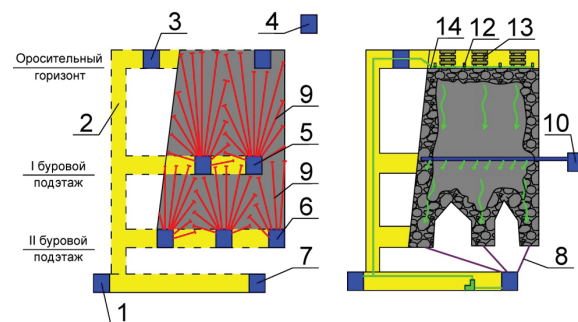


Рис. 3. Подготовка блока к выщелачиванию: 1 – транспортный штрек; 2 – восстающий; 3, 11 – штреки для орошения; 4 – штрек для вентиляции; 5 – буровые штреки; 6 – дренажно-буровые штреки; 7 – дренажный штрек; 8 – дренажные скважины; 9 – промежуточный горизонт орошения; 12 – верхняя подсечка; 13 – костровая крепь; 14 – оросительная система

Fig. 3. Block arrangement for leaching: 1 is the transport drift; 2 is the raise; 3, 11 are the entries for irrigation; 4 is the ventilation drift; 5 is the drill drift; 6 is the drainage-drill drifts; 7 is the drainage drift; 8 are the drainage wells; 9 is the irrigation sublevel; 12 is the upper undercut; 13 is the pigsty crib; 14 is the irrigation system

Длина блока составляла 60 м, ширина от 26 м в центре до 10 м на флангах, высота 36 м.

Горизонт улавливания продукционных растворов был выполнен в виде дренажного штрека, с которого в днище блока пробурены дренажные скважины диаметром 67 и 85 мм в виде вееров по три скважины в каждом. Оросительная система была уложена на поверхности замагазинированной руды. Кровля оросительного горизонта поддерживалась тремя рядами костровой крепи. При дроблении руды применялись восходящие веера скважин диаметром 85 мм. Взрывание осуществлялось с ис-

пользованием ступеней замедления 25, 30, 75 и 100 мс. В торцах дренажно-буровых штреков

Параметры буровзрывных работ по блоку 2: линия наименьшего сопротивления 2,6 м; расстояние между концами скважин 2 м; коэффициент сближения зарядов 0,97, длина скважин 9,5 м; расход ВВ 1,3 кг/м<sup>3</sup>; выход руды с I м скважин 3,9 м<sup>3</sup>/м; коэффициент использования скважин 0,8; коэффициент разрыхления 1,23; тип ВВ –граммонит 79/21, аммонал ВА8.

После отбойки каждого из 22 слоев качество дробления руды определялось методом фотопланиметрии во всех буровых штреках – перед отгрузкой, в процессе отгрузки и по окончании отгрузки с оценкой по суммарному выходу габаритных с точки зрения технологии выщелачивания классов.

Выщелачивание блока 2 продолжалось в течение года, однако удовлетворительных результатов не дало. Для выявления причин по замагазинированной руде был пройден контрольный орт длиной 18 м и из него штрек длиной 10 м.

В результате проведения контрольных выработок установлено: выход негабаритного класса в три раза превысил данные оценки степени дробления руды методом фотопланиметрии, и такая оценка качества дробления достоверна лишь для зоны в границах эллипсоида разрыхления; участок между буровыми штреками раздроблен неудовлетворительно; выявлены зоны переизмельченной руды и зоны повышенной фильтрации.

Опытными работами установлено, что традиционные способы подготовки месторождений для целей ПВ непригодны.

Способы ПВ скальных руд должны совершенствоваться на основе сплошной бесцеликовой отработки месторождений, что будет сочетаться со снижением удельных объемов подготовительно-нарезных работ в ходе совмещения функций выработок.

Примером этого направления может быть вариант системы ПВ на месторождении с крутопадающими рудными телами при доработке забалансовых запасов с этажной обойкой руды и выщелачиванием в инфильтрационном режиме. Недостатками варианта явились: опасность работ ввиду наличия больших площадей обнажения горных пород; трудоемкость работ по оформлению подсечек и возведению гидроизоляционного слоя; повышенный объем подготовительно-нарезных работ.

После освоения электровакуумных установок с целью повышения качества дренажа продукционных растворов исчезла надобность в нижней подсечке и гидроизоляционном слое. В трансформированном виде вариант стал выглядеть следующим образом (рис. 4).

Изменение схем орошения, дренажа и буровзрывных работ значительно улучшило экономические показатели. Трудоемкость системы снизилась в два с лишним раза, удельный вес нарезных работ в общем объеме запасов блока – в 3,1 раза, эффективность горно-подготовительных работ повысилась в 2,5 раза [7].

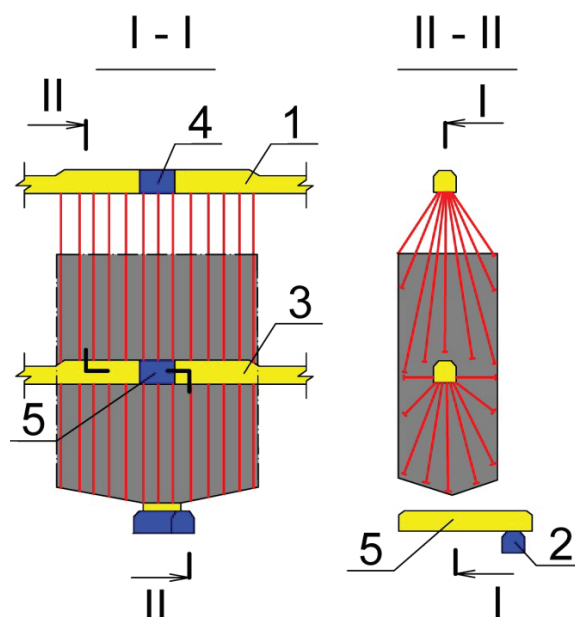


Рис. 4. Подготовка блока к выщелачиванию с совмещением функций выработок: 1 – оросительно-буровой штрек; 2 – нижний этажный штрек; 3 – буровой штрек; 4 – верхняя рассечка отрезной щели; 5 – нижняя рассечка отрезной щели; 6 – заходка

Fig. 4. Block arrangement for leaching combining the functions of workings: 1 is the irrigation-drift; 2 is the lower level drift; 3 is the drill drift; 4 is the slot upper cutting; 5 is the slot lower cutting; 6 is the cut

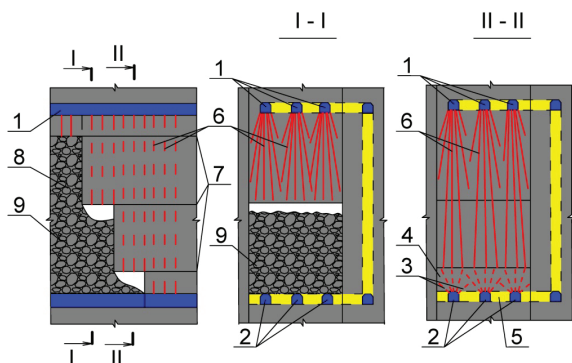
Применение на всех стадиях процесса выщелачивания высокоэффективного оборудования, внедрение прогрессивных способов и средств орошения, гидроизоляции блоков, улавливания продуктивных растворов, рациональных схем буровзрывных работ способны сокращать объемы подготовительно-нарезных работ в блоках ПВ, упрощать схемы их подготовки и удешевлять производство.

Разработка месторождений методом ПВ предъявляет иные требования к крупности руды, чем методом ТС. Продолжительность и полнота извлечения полезных компонентов из руд зависят от степени дробления, а также от равномерной плотности размещения раздробленной руды, обеспечивающей смачивание её без образования неорошаемых зон [8].

При отбойке руды вертикальными слоями необходим частичный выпуск, в результате чего образуются зоны с различным коэффициентом разрыхления с неравномерной фильтрацией рабочих растворов. Отбойка с помощью массовых взрывов, при всех её преимуществах по сравнению с послойной, обладает важным недостатком – ограниченной областью применения по геологическим и горнотехническим условиям.

Этот недостаток может быть устранен при формировании компенсационного пространства внутри каждого отбиваемого объема. Отбойку руды вертикальными слоями производят на горизонтальную подсечку по-ярусно снизу вверх секционным взрыванием скважин с опережением подсеч-

ки по мере отбойки слоев на толщину отбиваемого вертикального слоя (рис. 5).



**Рис. 5.** Формирование компенсационного пространства внутри отбиваемого объема: 1 – выработки горизонта орошения; 2 – выработки горизонта улавливания растворов; 3 – восходящие скважины; 4 – горизонт подсечки; 5 – отбитая руда; 6 – нисходящие скважины; 7 – границы секций; 8 – замагистринированная руда; 9 – руда, нуждающаяся в дополнительном дроблении

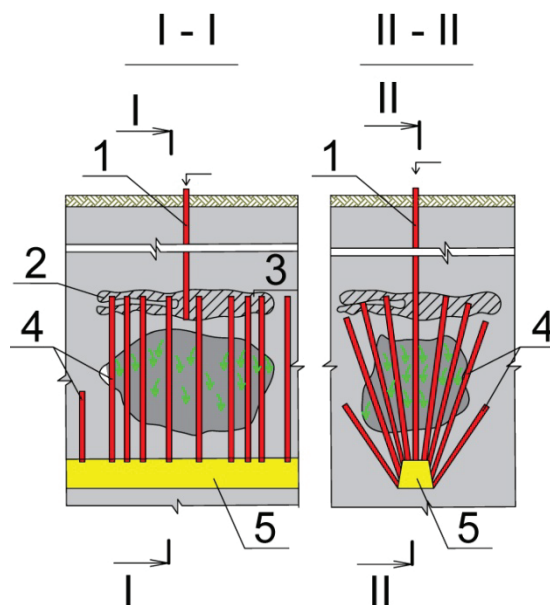
**Fig. 5.** Formation of compensating space inside the breaking volume: 1 are the workings of irrigation horizon; 2 are the workings of solution capturing horizon; 3 are the rising holes; 4 is the undercut level; 5 is the broken ore; 6 are the down holes; 7 are the section boundaries; 8 is the stored ore; 9 is the ore which should be additionally broken

Объем подсечки устанавливается с расчетом получения заданного коэффициента разрыхления обрушаемой на неё руды и образования между выпускными выработками навалов отбитой руды, которую невозможно выпустить.

Над подсечкой рудный массив разбуривается веерами нисходящих взрывных скважин из выработок верхнего горизонта. Нисходящие веера заряжаются и отбивают руду вертикальными слоями, причем отбойка в вертикальных слоях ведется секционным взрыванием по – ярусно снизу вверх на сформированную для данного слоя горизонтальную подсечку. Высота секции устанавливается, исходя из условий обеспечения заданного гранулометрического состава.

Данный способ позволяет сформировать в блоке подземного выщелачивания среду равной плотности, улучшить качество дробления и уплотнения руды и уменьшить объем подготовительно-нарезных работ. Отработка забалансовых руд методом ПВ позволяет снизить себестоимость продукции по сравнению с базовым способом на 25 % [9].

Горизонт орошения может формироваться путем гидравлического разрыва с заполнением образованных трещин фильтрующим мелкозернистым материалом. Способ включает в себя проведение подготовительных выработок в нижней части блока и бурение над рудным телом с поверхности вертикальной скважины, из которой над блоком производится гидравлический разрыв пород (рис. 6) [10].



**Рис. 6.** Формирование горизонта орошения способом гидравлического разрыва: 1 – скважина; 2 – трещины; 3 – фильтр; 4 – восходящие скважины; 5 – растворосборник

**Fig. 6.** Formation of irrigation horizon by hydraulic fracturing: 1 is the well; 2 are the cracks; 3 is the filter; 4 is the rising holes; 5 is the solution tank

Дренажная система может быть выполнена перфорированными трубами в днище блока. Полная гидроизоляция днища предусматривает проведение подсечных выработок в днище блока с последующей их гидроизоляцией и заполнением твердеющей закладкой [11].

В ходе извлечения полезного компонента из партии руды весом 500 кг в перколяторе высотой 10 м установлено, что при одинаковой крупности руды (–350+0 мм) скорость процесса извлечения по высоте резко снижается на нижних участках. Снижение скорости извлечения происходит вследствие уменьшения градиента концентраций между поровым раствором и общим объемом растворителя. При высоте рудного слоя 10 м, концентрации реагента в рабочем растворе 15 г/л, непрерывном орошении извлечение составило 59 % за 300 суток [12].

На той же руде, но с различной крупностью по высоте слоя (в верхней части –200+0 мм с уменьшением до –100+0 мм в нижней части), извлечено 59 % уже за 260 суток.

Руду целесообразно дробить на куски, крупность которых изменяется пропорционально снижению градиента концентрации между поровым раствором и объемом растворителя [13]. Дифференцированное дробление руды возможно при отбойке горизонтальными слоями с переменной линией наименьшего сопротивления.

В настоящее время способ ПВ получает развитие на рудниках ПГХК, где прошли стадию опытно-промышленного освоения многие аспекты технологии [14–17].

Результаты исследования хорошо согласуются с данными исследований по затронутой теме [18–20].

#### Заклучение

Совершенствование способов ПВ скальных руд в рамках проблемы комплексного и полного освоения недр развивается на основе сплошной поточной технологии извлечения полезных компонентов из руд.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-химическая геотехнология / под общ. ред. В.Ж. Аренса. – М.: Горная книга, 2010. – 57 с.
2. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. В 2 т. Т. 1. Уран / под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Руда и металлы, 2005. – 407 с.
3. Святецкий В.С., Литвиненко В.Г., Морозов А.А. О возможности и условиях применения блочного подземного выщелачивания урановых руд Стрельцовского месторождения // Горный журнал. – 2012. – № 10. – С. 78–84.
4. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания / В.К. Бубнов, Э.К. Спирин, А.Е. Воробьев и др. – Целиноград: Жана-Арка, 1992. – 545 с.
5. Кошик Ю.И., Ляшенко В.И. Научное сопровождение уранового производства в Украине // Экологія довкілля та безпека життє діяльності. – 2006. – № 6. – С. 5–17.
6. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов / В.К. Бубнов, В.И. Голик, А.М. Капканщиков и др. – Акмола: Жана-Арка, 1995. – 601 с.
7. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region // Medwell Journals. The Social Sciences. – 2015. – № 10 (5). – P. 678–681.
8. Ляшенко В.И. Совершенствование добычи полезных ископаемых комбинированными способами выщелачивания // Горный журнал. – 2001. – № 1. – С. 98–103.
9. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, I. Gaponenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 7. – P. 383–386.
10. Аликулов Ш.Ш., Нажимов Ф.Ф. Анализ базовой модели подземного выщелачивания урана к природным условиям месторождения // ГИАБ. – 2015. – № 3. – С. 67–74.
11. Логачев А.В. К вопросу о геотехнологических вариантах поэтапной разработки месторождений // Цветная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 46–50.
12. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. М.: Инфра-М, 2014. – С. 131.
13. Литвиненко В.Г., Шелудченко В.Г., Филоненко В.С. Оптимизация крупности измельченного рудного сырья и параметров его вскрытия // Горный журнал. – 2013. № 8 (1). – С. 44–50.
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. Лабораторные исследования процесса выщелачивания урана серноокислыми растворами, активированными ультразвуком / В.М. Лизункин, А.А. Морозов, А.А. Гаврилов, И.В. Лизункин // ГИАБ. – 2014. – № 10. – С.123–128.
16. Подземные геотехнологии разработки рудных месторождений / В.М. Лизункин, М.В. Лизункин, А.В. Бейдин и др. // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 89–94.
17. Овсейчук В.Л. Резник Ю.Н. Мязин В.П. Геотехнологические методы добычи и переработки урановых и золотосодержащих руд. – Чита: Чит ГУ, 2005. – 315 с.
18. Дребенштетт К. Ответственное использование и защита литосферы // Материалы 6-го горного коллоквиума (27–28.10.2011). – Фрайберг: Фрайбергская горная академия, 2012. – С.48–56.
19. Chamberlin P.D. Status of heap, dump and in-situ leaching of gold and silver // World Gold – 89. – Littleton, Colorado, 1989. – P. 225–232.
20. In-situ leaching (ICL) // Innovations in Gold and Silver Recovery. Phase IV. – Colorado: Randol Int. Ltd., 1992. – P. 1329–1336.

Поступила 26.05.2015 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

## EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF METAL UNDERGROUND LEACHING

**Vladimir I. Golik,**

North Caucasian State Technological University, 44, Nikolaeva Street,  
Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: v.i.golik@mail.ru

**Viktor G. Lukyanov,**

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

**Sergey G. Stradanchenko,**

Institute of the Service Sector and Entrepreneurship, 147, Shevchenko Street,  
Shakhty, 346500, Russia. E-mail: ssg72@mail.ru

**Stanislav A. Maslennikov,**

Institute of the Service Sector and Entrepreneurship, 147, Shevchenko Street,  
Shakhty, 346500, Russia. E-mail: MaslennikovSA@mail.ru

**The relevance** of the research is caused by the need to expand the scope of technology with underground leaching of metals in blocks, as a condition of satisfying natural growing needs of industry for raw materials.

**The main aim** of the research is to substantiate technical ability and economic feasibility of metal extraction from stockpiles, mainly polymetallic ores, non-conforming to traditional technologies for metal production, but suitable for application of innovative technologies of field development.

**Research methods:** semi-industrial tests in underground mining and laboratory researches in percolators with data processing based on multiple regression and correlation analysis and implementation of algorithms for interpretation of the experimental results, analysis of best achievements according to practice, the patent data and publications.

**Results.** The authors have determined new patterns of technological processes of metal extraction from ores by underground leaching. It is proved that the comprehensive improvement of technological processes of development system with underground leaching allows the new technology to compete with the conventional one, especially in the cases where traditional technologies are limited by the capabilities of today's technologies for processing metal ores.

**Conclusions.** The technology with metal underground leaching from rock ore is not a sufficiently used reserve for increasing metal production, first of all scarce and rare, including off-grade ores. The results of pilot tests of technological processes of underground leaching and theoretical calculations reveal sufficient correlation of practice and theory that indicates the possibility of controlling the course of obtaining metals with the adjustment of technology in the course of its development. Underground leaching of poor and off-balance ores will be developed as stocks in convenient regions of the Earth in the near future satisfying both economic and environmental components of mining humanization.

### Key words:

Underground leaching, metal, block, removing, reserves, traditional technology, research, processes, ecology, economy.

The research was supported by the grant MK-6986.2015.8 «Development of innovative design and process solutions when walking vertical mine shafts and mines».

### REFERENCES

1. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physical and chemical geotechnology]. Ed. by V.Zh. Arens. Moscow, Gornaya Kniga Publ., 2010. 57 p.
2. *Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugikh metallov. T. 1. Uran* [Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals. Vol. 1. Uranium]. Ed. by M.I. Fazlullin. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2005. 407 p.
3. Svyatetskiy V.S., Litvinenko V.G., Morozov A.A. O vozmozhnosti i usloviyakh primeneniya blochnogo podzemnogo vyshchelachivaniya uranovykh rud Streltsovskogo mestorozhdeniya [On the possibility and the conditions of application of the block-situ leaching of uranium ore deposits Streltsovsky]. *Mining Journal*, 2012, no. 10, pp. 78–84.
4. Bubnov V.K., Spirin E.K., Vorobev A.E., etc. *Teoriya i praktika dobychi poleznykh iskopaemykh dlya kombinirovannykh sposobov vyshchelachivaniya* [Theory and practice of mining combined leach]. Tselinograd, Zhana-Arka Publ., 1992. 545 p.
5. Koshik Yu.I., Lyashenko V.I. Nauchnoe soprovozhdenie uranovogo proizvodstva v Ukraine [Scientific support of uranium production in Ukraine]. *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhitte diyalnosti*, 2006, no. 6, pp. 5–17.
6. Bubnov V.K., Golik V.I., Kapkashchikov A.M., et al. *Aktualnye voprosy dobychi tsvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov* [Topical issues of production of non-ferrous, rare and precious metals]. Akmola, Zhana-Arka Publ., 1995. 601 p.
7. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region [Diversification of the economic foundations of depressive mining region]. *Medwell Journals. The Social Sciences*, 2015, no. 10 (5), pp. 678–681.
8. Lyashenko V.I. Sovershenstvovanie dobychi poleznykh iskopaemykh kombinirovannymi sposobami vyshchelachivaniya [Improving mining combined leaching process]. *Mining Journal*, 2001, no. 1, pp. 98–103.
9. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Gaponenko I. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new meth-



- ods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 7, pp. 383–386.
10. Alikulov Sh.Sh., Nazhimov F.F. Analiz bazovoy modeli podzemnogo vyshchelachivaniya urana k prirodnym usloviyam mestorozhdeniya [Analysis of the basic model of underground leaching of uranium deposits to natural conditions]. *GIAB*, 2015, no. 3, pp. 67–74.
  11. Logachev A.V. K voprosu o geotekhnologicheskikh variantakh poetapnoy razrabotki mestorozhdeniy [On the question of geotechnical options of phased mining]. *Non-ferrous Metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 46–50.
  12. Golik V.I. *Spetsialnye sposoby razrabotki mestorozhdeniy* [Special methods of field development]. Moscow, Infra-M Publ., 2014. P. 131.
  13. Litvinenko V.G., Sheludchenko V.G., Filonenko V.S. Optimizatsiya krupnosti izmelchennogo rudnogo syr'ya i parametrov ego vskrytiya [Optimization size of crushed ore raw materials and parameters of its opening]. *Mining Journal*, 2013, no. 8 (1), pp. 44–50.
  14. Morozov A.A., Smagin A.P., Beznosov G.F., Yurtaev A.N. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti blochnogo podzemnogo vyshchelachivaniya urana iz bednykh rud Strel'tsovskogo rudnogo polya [Technical and economic evaluation of the effectiveness of the block-situ leaching of uranium from low-grade ores Strel'tsovsky ore field]. *Mining Journal*, 2013, no. 8 (2), pp. 129–131.
  15. Lizunkin V.M., Morozov A.A., Gavrilov A.A., Lizunkin I.V. Laboratornye issledovaniya protsessov vyshchelachivaniya urana sernokisl'nyimi rastvorami, aktivirovannymi ultrazvukom [Laboratory studies of uranium leaching sulfuric acid solutions activated by ultrasound]. *GIAB*, 2014, no. 10, pp. 123–128.
  16. Lizunkin V.M., Lizunkin M.V., Beidin A.V. Podzemnyye geotekhnologii razrabotki rudnykh mestorozhdeniy [Geotechnology underground mining of ore deposits]. *GIAB*, 2015, no. 1, pp. 89–94.
  17. Ovseychuk V.L., Reznik Yu.N., Myazin V.P. *Geotekhnologicheskie metody dobychi i pererabotki uranovykh i zolotosoderzhashchikh rud* [Geotechnological methods of extraction and processing of uranium and gold ores]. Chita, Chita State University Press, 2005. 315 p.
  18. Drebenshtedt K. Otvetstvennoe ispolzovanie i zashchita litosfery [Responsible use and protection of the lithosphere]. *Materialy 6th Gornogo Kollokviuma (27–28.10.2011)* [Proc. 6<sup>th</sup> Mining Colloquium (27–28 October 2011)]. Freiberg, Freiberg University of Mining and Technology Press, 2012. pp. 48–56.
  19. Chamberlin P.D. Status of heap, dump and in-situ leaching of gold and silver. *World Gold – 89*. Littleton, Colorado, 1989. pp. 225–232.
  20. In-situ leaching (ICL). *Innovations in Gold and Silver Recovery. Phase IV*. Colorado, Randol Int. Ltd., 1992. pp. 1329–1336.

Received: 26 May 2015.

УДК 556; 330.15; 332.36

## ЭКОЛОГИЗАЦИЯ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**Попов Виктор Константинович,**

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pvk@tpu.ru

**Козина Мария Викторовна,**

старший преподаватель кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: marijamkozina@gmail.com

**Актуальность работы** обусловлена тем, что кадастровая оценка земель является важным элементом управления земельными и водными ресурсами, поэтому достоверность и качество ее результатов имеет важное значение как для развития научно-методических основ оценки, так и в практической деятельности, в области управления земельными и водными ресурсами урбанизированных территорий для ее устойчивого развития. В данной статье оценка земель рассматривается не только как целевое специализированное мероприятие, но и как постоянная развивающаяся система оценочных мероприятий, основанная на принципах концепции экологизации.

**Цель:** произвести анализ результатов и последствий кадастровой оценки земель за прошедшие три тура ее проведения. Предложить подходы к оценке стоимости урбанизированных территорий с учетом принципов концепции экологизации.

**Методы:** теоретического анализа изучения и обобщения, а также иные общепринятые аналитические методы.

**Результаты.** Выявлены проблемы недостаточного учета экологической составляющей в методиках кадастровой оценки земель, а также проблемы узкой области использования результатов кадастровой оценки. В результате анализа были выделены в особую группу природные факторы (гидрологические особенности территории, геологические (геоморфологические) условия территории), которые обязательно должны иметь свое отражение в результатах кадастровой оценки. Сделан вывод о перспективах использования результатов оценки с учетом данной группы факторов не только для налогообложения, но и для применения их в качестве индикаторов для оценки устойчивости процесса развития экономических, экологических и социальных систем урбанизированных территорий. Реализация данного предложения позволит обеспечить сопоставимость земельно-кадастровой информации с физико-географическими, геологическими и гидрогеологическими условиями территории.

**Ключевые слова:**

Кадастровая оценка, экологизация, природопользование, урбанизированные территории, земельные отношения, оценка, эффективность.

### Введение

Проводимые экономические преобразования в России во многом определили значение и роль управления земельными ресурсами страны. Для рационального использования земель требуется эффективное и научно обоснованное управление процессами. В системе управления земельными ресурсами важную роль играет система платежей за землю, так как земля перестала восприниматься только как средство производства и ресурс материальных благ, она приобрела свойства товара. С принятием закона «О плате за землю» в 1991 г. было точно определено, что использование земли в РФ является платным. Это означало, что собственники земли, землевладельцы и землепользователи должны были своевременно уплачивать земельный налог [1–3]. Работы по государственной кадастровой оценке земель впервые были начаты в России в 1999 г. Правительством Российской Федерации была определена цель кадастровой оценки земель – введение экономических методов управления земельными ресурсами и повышение эффективности использования земель. Результатом ра-

бот по государственной кадастровой оценке земель (ГКОЗ) являются удельные показатели кадастровой стоимости земель в разрезе кадастровых кварталов по видам разрешенного использования. При этом реальный размер земельного налога определяется ставкой земельного налога, которая устанавливается в процентах от налоговой базы (кадастровой стоимости) и относится к компетенции органов местного самоуправления в пределах, определенных федеральным законодательством. Таким образом, кадастровая оценка земель стала служить базой для исчисления земельного налога и арендных платежей, которая основывается на классификации земель по целевому назначению. Разработка методик кадастровой оценки земель в РФ опиралась на зарубежный опыт путем перевода на русский язык книг современных американских авторов. Зарубежные методики основывались на многолетней статистике продаж недвижимости, имеющейся в развитых странах. Таким образом, в начале 1990-х гг. переведенные на русский язык труды Дж.К. Эккерта [4], Генри С. Харрисона и Дж. Фридмана [5] за не продолжительное время

стали классикой [6]. Эти работы обобщали обширную американскую практику оценки 70–80-х гг. прошлого века [7].

За прошедшие 15 лет было проведено три тура ГКОЗ городских и сельских населенных пунктов. ГКОЗ реализуется на основе статистического анализа рыночных цен и иных сведениях [8, 9]. Затем строится статистическая модель расчета кадастровой стоимости земельных участков, зависящая от факторов стоимости. Состав факторов определяется на основе примерного перечня факторов стоимости (рекомендованного методикой) и анализа информации о рынке недвижимости. В примерный перечень факторов входят физические характеристики земельного участка (вид разрешенного использования земельного участка, площадь), характеристики местоположения, окружения (близость к зонам рекреации, водным объектам), социальная инфраструктура, наличие коммунальной инфраструктуры, состояние окружающей среды (уровень загрязнения), градостроительная информация и социально-экономические показатели (численность населения). В качестве рыночной информации используются цены сделок (купля-продажа, аренда, ипотека).

ГКОЗ сельскохозяйственных угодий вне черты городских и сельских населенных пунктов и земель лесного фонда реализуется на основе капитализации расчетного рентного дохода [10].

ГКОЗ на территории Томской области проводится с 2000 г. В период с 2006 по 2007 г. на территории Томской области проводились работы по актуализации результатов ГКОЗ сельскохозяйственного назначения. Всего в Томской области было оценено 4486 участков. Последний тур кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения был проведен в 2013 г. для 16 муниципальных районов и 4 городских округов, где было оценено 17770 земельных участков. Актуализация результатов кадастровой оценки земель населенных пунктов на территории Томской области была проведена в 2008 г. по состоянию на январь 2007 г. В 2012 г. возникла необходимость очередного тура работ по ГКОЗ. В рамках Государственного контракта от 15.08.2012 № 85Д/2012 были организованы и проведены работы по обновлению результатов ГКОЗ населенных пунктов по состоянию на 1 июня 2012 г.

Согласно данным Департамента экономического развития и управления муниципальной собственностью администрации г. Томска, после проведения ГКОЗ г. Томска в 2012 г. их стоимость составила 237,6 млрд р. (рис. 1), то есть по сравнению с прошлым годом снизилась на 2,3 млрд р. или на 1 %. Стоимость земли, занятой автостоянками, а также находящейся в пользовании местных жителей под домами и гаражами, увеличилась, при этом кадастровая стоимость земли, находящейся под промышленными объектами, не увеличилась.

Основную налогооблагаемую базу земельного налога в г. Томске составляют объекты торговли,

общепита и бытового обслуживания. Земельный налог на эти объекты деятельности сократился на 10,4 млрд р. Налог на объекты образования и науки, здравоохранения, физкультуры и спорта, соцобеспечения, культуры и искусства сократился на 60,4 млрд р., что в 6 раз больше, чем на объекты торговли, общепита и бытового обслуживания.

Такое снижение налога повлекло уменьшение доходной части бюджета города Томска. По предварительным подсчетам, только по земельному налогу в 2014 г. город, возможно, недополучит 200 млн р., что является негативной тенденцией для бюджета города. Вследствие негативных последствий для социально-экономического развития Томской области полученные результаты были признаны утратившими силу с 1 января 2014 г. До 1 января 2015 г. продолжали применяться результаты ГКОЗ в составе земель населенных пунктов, утвержденные постановлением Администрации Томской области от 24.12.2008 г. № 262а. В 2014 г. по результатам электронного аукциона была определена оценочная организация, которая актуализировала предыдущую кадастровую оценку (2008 г.) земельных участков в Томске. Итогом работы стала оценка почти 59 тысяч земельных участков, сгруппированных по семнадцати видам разрешенного использования, из них 70 % приходится на земельные участки под индивидуальное жилищное строительство, дачное строительство, садоводство и огородничество. На 6–10 % произошел рост стоимости земли, к примеру, по таким основным видам разрешенного использования, как эксплуатация производственных объектов, объектов коммунального хозяйства, торговли, общественного питания, а также для дачного строительства и огородничества. Общая кадастровая стоимость составила 316 млрд р. Рост произошел на 30 % от действующей кадастровой оценки земельных участков 2008 г. (рис. 1). По результатам кадастровой оценки земель населенных пунктов в Томском районе в 2014 г. с целью исключения выпадающих доходов бюджета Томского района были пересмотрены размеры ставок арендной платы земельных участков на 2015 г. Таким образом, с 1 января 2015 г. действует новая кадастровая стоимость земель населенных пунктов Томской области, города Томска и земель сельскохозяйственного назначения.

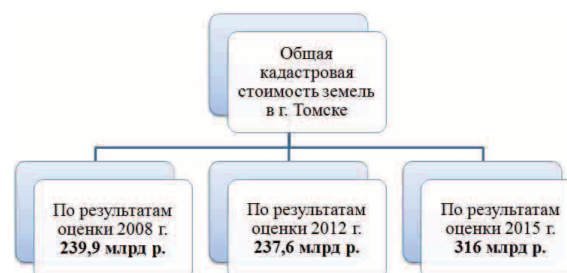


Рис. 1. Результаты кадастровой стоимости земель г. Томска

Fig. 1. Results of land cadastral value in Tomsk

Анализ результатов проведенной кадастровой оценки территории Томского района и г. Томска говорит о несовершенстве существующей методики. Доказательством чего служит непредсказуемый результат кадастровой оценки в 2012 г., что, в свою очередь, делает невозможность долгосрочного прогнозирования доходной части муниципального бюджета от имущественных налогов, поэтому такие результаты не способны обеспечить эффективное и справедливое налогообложение земли.

За почти пятнадцатилетний период методика кадастровой оценки земель постоянно подвергается критике научного и оценочного сообщества. Основная причина создавшегося положения заключается в выборе изначально неверной методологии установления налогооблагаемой базы по земле специалистами органов власти, отвечающих за развитие данного направления [11]. Технология выполнения работ с незначительными дополнениями и доработками осталась прежней и не была скорректирована. К основным недостаткам существующей методики О.Е. Медведева, Д.С. Львов [11] и другие [12] относят: отсутствие законодательного определения понятия «кадастровая стоимость»; достаточно сложный математический аппарат, не позволяющий понять технологию расчета и, как следствие, правильно проанализировать полученный результат; методика рассчитана на более развитый рынок земель, чем тот, что существует сегодня; отсутствие четкого регламента согласования результатов ГКОЗ и др. [11]. Несмотря на критику, методика кадастровой оценки земли не претерпела практически никаких изменений.

Можно предполагать, что власти видят решение таких вопросов на уровне её организации и проведения, а не в изменении подходов государственной кадастровой оценки земель в целях её совершенствования и преодоления противоречий на уровне получения, обработки и экспертизы результатов оценки.

На наш взгляд, существующие подходы к оценке стоимости урбанизированных территорий ориентируются прежде всего на экономическую целесообразность использования того или иного земельного участка и в меньшей степени отражают его экологическое состояние, несмотря на то, что утвержденная методика кадастровой оценки декларирует учет факторов, характеризующих состояние окружающей среды. Проблема недостаточного учета экологической составляющей в земельных отношениях в Томской области и в России в целом в последнее десятилетие становится очевидной [13].

Поэтому оценка земель должна рассматриваться как система мероприятий, способная адаптироваться к постоянным изменениям: качества окружающей среды, социально-экономического процесса организации территории и производственных средств, связанных с землей: степени развития инженерной и производственной инфраструктуры, социально-бытового обслуживания населе-

ния, состояния инженерно-геологических условий, способных оказать разрушительные воздействия на территорию. В этой связи главное значение приобретает концепция экологизации урбанизированных территорий.

Экологизация – это система мероприятий, направленных на сохранение природной среды и поддержание экологического равновесия географической среды, которая трансформируется под воздействием изменения производительных сил и производственных оснащений. Экологизация в области земельно-имущественных отношений и оценки урбанизированных территорий подразумевает учет эколого-экономического и социального эффектов от хозяйственных сфер деятельности на урбанизированных территориях.

Круг системно рассматриваемых объектов экологизации включает [14]: элементы нарушенных естественных ландшафтов, комплексы охраняемых природных территорий, производственно-техническую деятельность человека (транспорт, строительство, промышленность, энергетику, водоснабжение), социально-экономическую сферу и др.

Рассмотрим, например, урбанизированную водосборную территорию нижнего течения р. Томи, в состав которой входят земли г. Томска, г. Северска, Томского и Шегарского районов. Развитие рассматриваемой урбанизированной территории в первую очередь зависит от качества земельных ресурсов и хозяйственной деятельности производимой на ней. Рассматриваемая территория является интенсивно развивающейся, на ней сосредоточены основные процессы жизнедеятельности человека, объекты земельно-имущественного комплекса различного функционального назначения, которым необходимо находиться в экологическом равновесии с природой для повышения качества жизни населения.

К отличительной черте рассматриваемой урбанизированной территории необходимо отнести то, что территория находится в юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, где все водоносные комплексы находятся в состоянии оживленного водообмена и содержат инфильтрационные воды, имеющие сходный гидрогеохимический облик. Только в северной части междуречья воды меловых и палеозойских образований расположены в зоне замедленного водообмена. На территории Обь-Томского междуречья (ОТМ) расположены 45 населенных пунктов: 38 населенных пунктов относятся к шести административным сельским округам Томского района, пять из них входят в состав Шегарского района и один – в состав Кожевниковского района. Кроме этого, п. Нижний Склад административно входит в городскую черту Томска.

На этой территории совместно эксплуатируются инженерные системы водохозяйственного и военно-промышленного комплекса. Комплекс сооружений подземного водозабора занимает террито-

рию равную пяти гектарам (рис. 2). В эксплуатации находятся 198 скважин, в постоянной работе задействованы 93, остальные резервные. Глубина залегания скважин составляет от 80 до 198 м, среднесуточная подача воды в город – 136 тыс. м<sup>3</sup>. В город вода транспортируется по двум водоводам. Томский водозабор подземных вод состоит из 2 линейных рядов водозаборных скважин. Участки недр расположены на территории Томского района и г. Томска.

Длительная добыча питьевой воды из водоносных горизонтов Томского водозабора привела к формированию в них крупной депрессионной воронки. В 1989 г. появились первые признаки подсоса вод из подстилающих меловых горизонтов. Для городов Томска, Северска и прилегающих сельских территорий важнейшими негативными последствиями существования воронки являются: гидродинамические и гидрохимические изменения в характеристиках гидросферы; снижение уровня грунтовых вод; развитие процессов истощения подземных вод и их загрязнение, в результате чего происходит оседание земной поверхности и преобразование естественных ландшафтов и изменение подземного стока. Для производителей сельскохозяйственной продукции это означает осушение почв, а следовательно, и снижение урожайности, требующее дополнительных затрат на орошение и мелиорацию земель. В результате аграрный комплекс несет убытки в виде упущенной выгоды.

С методологических позиций территорию нижнего течения р. Томи необходимо рассматривать как естественную эколого-экономическую модель,

позволяющую дать оценку эффективности эксплуатации природных ресурсов (водных и земельных) и их устойчивости развития. Устойчивость развития данной территории должна включать рассмотренные особенности модели, которые должны быть использованы при проведении кадастровой оценки урбанизированных территорий, что позволит ликвидировать социально-экономические конфликты при налогообложении земельно-имущественного комплекса.

В настоящее время одной из причин социально-экономических конфликтов между населением ОТМ и жителями областного центра является интенсивное использование ресурсов подземных вод, которое практически не компенсируется, с одной стороны, а с другой – необеспеченность сельского населения доброкачественной водой. Конфликт имеет социальную природу, т. к. опасности истощения водоносных горизонтов в ближайшие 30–50 лет не предвидится [16]. Именно поэтому профилактика конфликта должна быть направлена на повышение эффективности, рациональности и безопасности эксплуатации такой жизнеобеспечивающей системы, как систем водоснабжения г. Томска, а также на улучшение условий водоснабжения населения территории ОТМ.

К сожалению, на уровне принятия решений по организации землепользования данной территории сиюминутные экономические соображения превалируют над экологическими. Взаимосвязь водных, земельных ресурсов, являющихся элементами природной среды и производственно-хозяйственной сферы, отражается в эколого-экономическом аспекте природопользования.

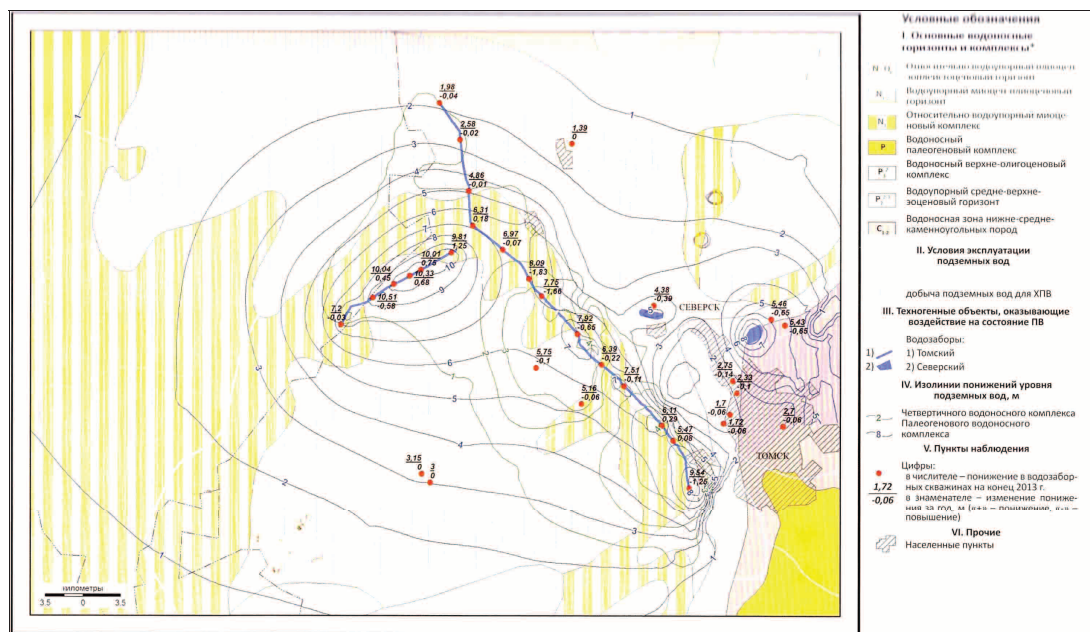


Рис. 2. Схематическая карта условий эксплуатации подземных вод в зоне влияния Томского водозабора подземных вод (ООО «Томскводоканал») в 2013 г. [15]

Fig. 2. Schematic map of underground water service conditions within the catchment area of Tomsk underground water intake (Tomskvodokanal) in 2013 [15]

Также геологические, физико-географические и гидрогеологические условия территории г. Томска являются потенциально опасными по развитию экзогенных условий. Согласно исследованиям В.Е. Ольховатенко, В.К. Попова, Г.М. Рогова, В.А. Коробкина, Г.П. Щербака [17–20] и др. в пределах территории г. Томска широким развитием пользуются различные негативные физико-геологические процессы и явления.

К различным негативным физико-геологическим процессам и явлениям, развивающимся на территории г. Томска, необходимо отнести подтопление, оползни, заболачивание, морозное пучение и другие.

На ряду с природными, в пределах городской территории, большое влияние на развитие опасных процессов оказывают и техногенные факторы:

уплотнение застройки городских территорий, сгущение подземного пространства сетями инженерных коммуникаций, увеличение интенсивности движения транспорта и динамических нагрузок, застройка территорий, находящихся в зонах геоэкологического риска, подрезка и пригрузка склонов 9–10 этажными жилыми домами, горнопроходческие работы и др. Подтоплению территории способствуют производства ГРЭС-2 и других предприятий с большим потреблением воды.

На территории города существует опасность сезонного затопления отдельных участков в прибрежной полосе во время паводка.

Учеными ТГАСУ [17–18] были сделаны комплексные исследования, позволившие выявить закономерности развития опасных геоэкологических процессов на территории г. Томска, на осно-

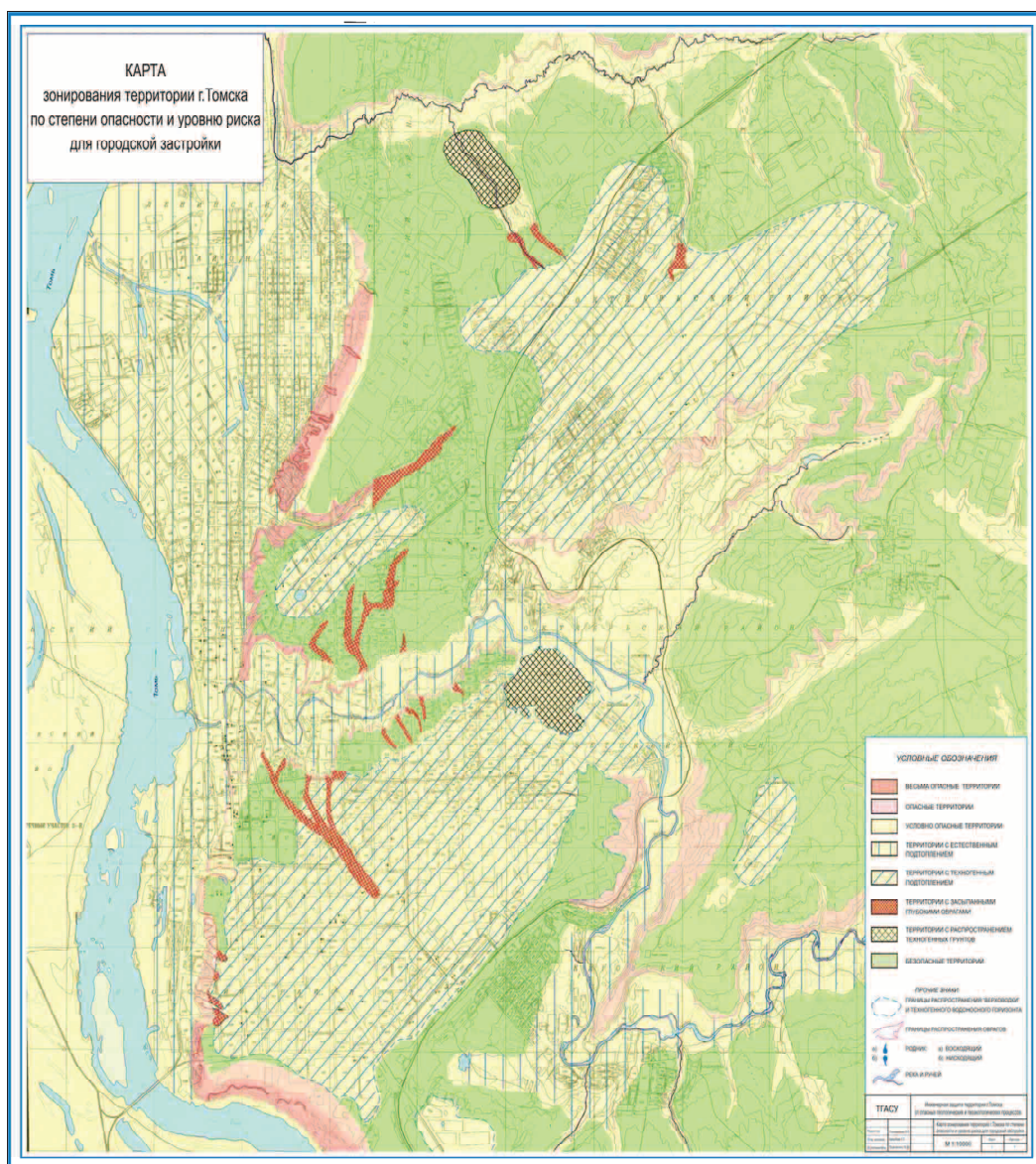


Рис. 3. Карта зонирования территории г. Томска по степени опасности и уровню риска для городской застройки [17]

Fig. 3. Zoning map of Tomsk by the hazard rate and risk level for urban development [17]

вании чего была составлена карта зонирования городской территории по степени опасности и уровню риска по городской застройке (рис. 3).

В связи с этим возникает необходимость определения объективных факторов, оказывающих влияние на эффективность землепользования и, как следствие, на стоимость земельных участков.

### Заключение

В результате факторного анализа были выделены в особую группу такие факторы, как природные, включающие в себя: гидрологические особенности территории (режим подземных вод, наличие воронки депрессии), геологические (геоморфологические) условия территории.

Учитывая, что результаты ГКОЗ в конечном итоге влияют как на объём платежей юридических и физических лиц за право пользования землей, так и на доходную часть бюджета, в целях соблюдения интересов правообладателей земельных участков и исключения возможных фактов ущемления интересов бюджета предлагается, чтобы данная группа факторов обязательно имела свое отражение в результатах ГКОЗ. Так как именно они определяют величину упущенной выгоды, если говорить о сельском хозяйстве; удорожание строительства; стоимость ремонтных работ при эксплуатации объектов капитального строительства, инженерной и транспортной инфраструктуры; проявляются в повышении или в снижении стоимости объектов недвижимости, примером чего служит проведенная оценка в г. Томске и Томском районе, что в свою очередь влияет на снижение инвестиционной привлекательности в определенных районах.

На основании учета таких факторов в ГКОЗ, ее результаты смогут быть не только базой для налогообложения, но и смогут служить основой для принятия управленческих решений в размещении на территории различных видов жилой застройки, промышленности, объектов обслуживания населе-

ния, улично-дорожной сети, а также смогут определить условия функционирования городской территории и предопределить меру рентабельности в долгосрочной перспективе, так как кадастровая стоимость будет показателем степени благоприятности территории для различных целей.

Реализация данного предложения позволит обеспечить сопоставимость земельно-кадастровой информации с физико-географическими, геологическими и гидрогеологическими условиями и будет справедливо отражена в результатах оценки. В свою очередь это будет способствовать справедливому налогообложению недвижимости и правительственному восприятию населения.

Это позволит:

- утверждать целесообразность инвестиционных проектов;
- оценивать влияние возводимого объекта на существующую застройку еще на уровне проекта;
- просчитывать на долгосрочную перспективу социальные, экологические и другие риски;
- экономически обосновывать справедливость ценообразования на земельные участки;
- определять степень инвестиционной привлекательности территории;
- более активно развивать земельный рынок;
- эффективно осваивать земельные ресурсы уже с учетом их качества;
- определять убытки от нерационального и не комплексного использования земельных участков;
- решать другие задачи, связанные с рациональным использованием городских земель.

Такой системный подход позволит использовать результаты оценки земельных ресурсов в качестве индикаторов для оценки устойчивости процесса развития экономических, экологических и социальных систем в городе, а также позволит давать обоснованные долгосрочные прогнозы развития земельно-имущественной системой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов А.А. Земельный кадастр: в 6 т. Т. 4. Оценка земель. – М.: КолосС, 2006. – 463 с.
2. Никишин И.В. Анализ развития оценки земель в России // Известия ВУЗОВ. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2013. – № 2 (5). – С. 29–37.
3. Земельный кодекс Российской Федерации: федер. закон от 25.10.2001 года № 136-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2001. – № 44. – Ст. 4147.
4. Эккерт Д.К. Оценка земельной собственности / пер. с англ. О.О. Непомнящего. – Красногорск, Красная гора, 1993. – 61 с.
5. Фридман Д., Ордуй Н. Анализ и оценка приносящей доход недвижимости. – М.: Дело, 1997. – 480 с.
6. Горбатенко А.А. Методы оценки качества городских территорий // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 84–86.
7. Коростелев С.П. Кадастровая оценка недвижимости. – М.: Маросейка, 2010. – 357 с.
8. Об утверждении федерального стандарта оценки «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки (ФСО № 1)»: приказ Минэкономразвития России от 20.05.2015 № 297. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=180064> (дата обращения: 25.09.2015).
9. Об утверждении Методических указаний по государственной кадастровой оценке земель населенных пунктов: приказ Минэкономразвития РФ от 15.02.2007 № 39 // Российская газета. – 2007. – № 100.
10. Об утверждении Методических рекомендаций по государственной кадастровой оценке земель сельскохозяйственного назначения: приказ Министерства экономического развития и торговли Российской Федерации от 04.07.2005 № 145. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=117995> (дата обращения: 25.09.2015)
11. Медведева О.Е., Козлов В.М., Козлов П.В. Проблемы государственной кадастровой оценки земель и предложения по ее совершенствованию // Вопросы оценки. – 2010. – № 2 (11). – С. 58–64.
12. Рогатнев Ю.М. Новый земельный строй России. Размышления о стратегии развития // Вестник Омского гос. аграр. ун-та. – 2011. – № 2 (2). – С. 37–40.

13. Попов В.К., Серяков С.В., Хафизова Р.Э. Экологизация землеустройства урбанизированных территорий в городе Томске: состояние и проблемы // Вестник Том. Гос. арх.-строит. ун-та. – 2013. – № 2 (39). – С. 337–345.
14. Попов В.К., Аносова Н.В., Студенова М.В. Регулирование отношений землеустройства в рамках экологизации водохозяйственной деятельности // Вестник Том. Гос. арх.-строит. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 187–193.
15. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского Федерального округа в 2013 году: информационный бюллетень / гл. ред. В.А. Лыготин. – Томск, 2014. – 244 с.
16. Эколого-экономические аспекты эксплуатации подземных вод Обь-Томского междуречья / В.К. Попов, О.Д. Лукашевич, В.А. Коробкин. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2003. – 174 с.
17. Ольховатенко В.Е., Рутман М.Г., Лазарев В.М. Опасные природные и техноприродные процессы на территории г. Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем. – Томск: Печатная мануфактура, 2005. – 151 с.
18. Ольховатенко В.Е., Лазарев В.М., Филимонова И.С. Геоэкологические проблемы застройки территории г. Томска и мероприятия по ее инженерной защите // Вестник Том. гос. арх.-строит. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 141–150.
19. Ермохин А.И., Рихванов Л.П., Языков Е.Г. Руководство по оценке загрязнения объектов окружающей природной среды химическими веществами и методам их контроля. – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 94 с.
20. Коробкин В.А. Режим, формирование и использование подземных вод Обь-Томского междуречья (Томская область): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1986. – 23 с.

Поступила 28.09.2015 г.

UDC 556; 330.15; 332.36

## ECOLOGIZATION OF CADASTRAL VALUATION OF LANDS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF URBANIZED LANDS

**Viktor K. Popov,**

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

**Mariya V. Kozina,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: marijamkozina@gmail.com

**The relevance** of the research caused by the fact that cadastral valuation of lands is an important element of land and water management, so accuracy and quality of its results are significant both for development of scientific and methodological basis of estimates and in practice, in the field of land and water management of urbanized lands for its sustainable development. The paper considers land evaluation not only as a specific task but as the developing system of estimations based on the concept of ecologization as well.

**The main aim** of the research is to analyze the results and consequences of cadastral estimations for its past three rounds; to propose the approaches to cost estimations of urbanized lands taking into account the foundations of ecologization.

**Methods:** theoretical analysis of studying and generalization and other common analytical methods.

**Results.** The authors have determined the problems of insufficient consideration of an ecological component in the techniques of cadastral land valuation as well as the narrowness in application of the cadastral valuation results. As a result of the analysis, the authors singled natural factors relevant for Tomsk and Tomsk region, defining the cadastral value. The future use of the results of valuation considering this group of factors is stated not only for taxation but also for the robustness indication of the development of economical, ecological and social systems of urbanized lands.

**Key words:**

Cadastral valuation, ecologization, nature management, urbanized lands, land relations, estimation, efficiency.



## REFERENCES

- Varlamov A.A. *Zemelnyy kadastr. T. 4. Otsenka zemel* [Land Cadastre. Vol. 4. Land valuation]. Moscow, KolosS Publ., 2006. 463 p.
- Nikishin I.V. Analiz razvitiya otsenki zemel v Rossii [Analysis of the development in land estimation in Russia]. *Proceedings of Higher Education. Investments. Building. Real Estate*, 2013, no. 2 (5), pp. 29–37.
- Zemelnyy kodeks RF. Federalnyy zakon ot 25.10.2001 № 136-FZ* [Land Code of the Russian Federation. Federal Law of 25 October 2001, no. 136-FZ]. *Collected Legislation RF*, 2001, no. 44, art. 4147.
- Ekkert D.K. *Otsenka zemelnoy sobstvennosti* [Evaluation of land ownership]. Krasnogorsk, Red Mountain Publ., 1993. 61 p.
- Freedman D., Ordway N. *Analiz i otsenka prinosyashchey dokhod nedvizhimosti* [Analysis and evaluation of real estate income]. Moscow, Delo Publ., 1997. 480 p.
- Gorbatenko A.A. Metody otsenki kachestva gorodskikh territoriy [Methods of urban areas quality evaluation]. *Vestnik of South Ural State University. Ser. Building and Architecture*, 2013, no. 1, pp. 84–86.
- Korostelev S.P. *Kadastraya otsenka nedvizhimosti* [Cadastral valuation of real estate]. Moscow, Maroseyka Publ., 2010. 356 p.
- Federalnyy Standart Otsenki. Obshchie Ponyatiya Otsenki, Podkhody i Trebovaniya k Provedeniyu Otsenki (FSO № 1)* [The Federal Standard Assessment. General Concepts of Evaluation Approaches and Requirements for Assessment (FSO no. 1)]. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=180064> (accessed 25 September 2015).
- Metodicheskie ukazaniya po gosudarstvennoy kadastrvoy otsenke zemel naselennykh punktov. Utv. prikazom Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya RF ot 15.02.2007 № 39 [Methodological guidelines for state cadastral valuation of land settlements. Approved by the Ministry of Economic Development RF on 15 February 2007, no. 39]. *Russian Newspaper*, 2007, no. 100.
- Metodicheskie ukazaniya po gosudarstvennoy kadastrvoy otsenke zemel selskokhozyaystvennogo naznacheniya. Utv. prikazom Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya i trgovli RF ot 04.06.2005 № 145* [Guidelines for state cadastral valuation of agricultural land. Approved by the Ministry of Economic Development RF on 4 June 2005, no. 145]. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=117995> (accessed 25 September 2015).
- Medvedeva O.E., Kozlov V.M., Kozlov P.V. Problemy gosudarstvennoy kadastrvoy otsenki zemel i predlozheniya po ee sovershenstvovaniyu [Issues involved in national tax assessment of land values and some proposals for improving the situation]. *Issues and Estimations*, 2010, no. 2 (11), pp. 58–64.
- Rogatnev Yu.M. Novyy zemelnyy stroy Rossii. Razmyshleniya o strategii razvitiya [New ground system of Russia. Reflections about development strategy]. *Bulletin of Omsk State Farmers University*, 2011, no. 2 (2), pp. 37–40.
- Popov V.K., Seryakov S.V., Khafizova R.E. Ekologizatsiya zemleustroystva urbanizirovannykh territoriy v gorode Tomsk: sostoyanie i problemy [Land use planning ecologization of urbanized areas in Tomsk: status and problems]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2013, no. 2 (39), pp. 337–345.
- Popov V.K., Anosova N.V., Studenova M.V. Regulirovanie ot-nosheniy zemleustroystva v ramkakh ekologizatsii vodokhozyaystvennoy deyatel'nosti [Regulation of relations in land management within the framework of ecologization of water economic activity]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2010, no. 1, pp. 187–193.
- Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) territorii Sibirskogo Federal'nogo okruga v 2013 godu* [The condition of the geological environment (subsoil) territory of the Siberian Federal District in 2013]. Tomsk, 2014. 244 p.
- Popov V.K., Lukashevich O.D., Korobkin V.A. *Ekologo-ekonomicheskie aspekty ekspluatatsii podzemnykh vod Ob-Tomskogo mezhdurechya* [Ecological and economical aspects of groundwater exploitation of Ob-Tom instream areas]. Tomsk, TSUAB Publ., 2003. 174 p.
- Olkhovatenko V.E., Rutman M.G., Lazarev V.M. *Opasnye prirodnye i tekhnoprirodnye protsessy na territorii g. Tomsk i ikh vliyaniye na ustoychivost prirodno-tekhnicheskikh sistem* [Natural and technonatural hazardous processes in the city of tomsk and their influence on the strength of natural and technical systems]. Tomsk, Pechatnaya Manufaktura Publ., 2005. 151 p.
- Olkhovatenko V.E., Lazarev V.M., Filimonova I.S. Geoekologicheskie problemy zastroyki territorii g. Tomsk i meropriyatiya po ee inzhenernoy zashchite [Geoenvironmental problems of building on Tomsk territory and actions for its engineering protection]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2012, no. 1, pp. 141–150.
- Erokhin A.I., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G. *Rukovodstvo po otsenke zagryazneniya obektov okruzhayushchey prirodnoy sredy khimicheskimi veshchestvami i metodam ikh kontrolya* [Guidelines for estimating pollution of the natural environment of chemicals and methods of their control]. Tomsk, TPU Publ., 1997. 94 p.
- Korobkin V.A. *Rezhim, formirovanie i ispolzovanie podzemnykh vod Ob-Tomskogo mezhdurechya (Tomskaya oblast)*. Avoref. Dis. Cand. nauk [Mode, the formation and use of groundwater between the rivers Ob-Tomsk (the Tomsk region). Author's Abstract Cand. Diss.]. Tomsk, 1986. 23 p.

Received: 28 September 2015.

УДК 621.315.6(088.8)

## МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

**Смирнов Геннадий Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, директор Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи (НИИ ЭТОСС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.  
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Хасанов Олег Леонидович,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой наноматериалов и нанотехнологий, директор Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: khasanov@tpu.ru

**Смирнов Дмитрий Геннадьевич,**

канд. техн. наук, старший науч. сотрудник. Научно-исследовательского института электронного технологического оборудования и средств связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634045, г. Томск пр. Ленина, 40.  
E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Полисадова Валентина Валентиновна,**

канд. техн. наук, инженер-исследователь кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
E-mail: polis@tpu.ru

**Петюкевич Мария Станиславовна,**

аспирант, ассистент кафедры наноматериалов и нанотехнологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: petukevich@tpu.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью улучшения технологии пропитки электрических обмоток, повышения их качества и надежности.

**Цель работы.** Обоснование выбора магнитоэлектрического пропиточного состава и перспективности его применения для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических изделий.

**Методы исследования.** Электротепловые – для определения теплопроводности и теплоемкости; электромагнитные – для определения зависимости магнитной проницаемости состава от концентрации феррита; вискозиметры – для определения вязкости композиций пропиточных составов; ёмкостные – для контроля степени насыщенности межвитковых полостей обмотки пропиточным составом; высоковольтные – для исследования электрической прочности магнитоэлектрических композиционных составов.

**Результаты.** Установлено, что применение магнитоэлектрического состава для пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий способствует: во-первых, устранению всех энергоёмких, шумящих электромеханических устройств; во-вторых, обеспечению более равномерного полива лобовых частей; в-третьих, существенному повышению коэффициента пропитки обмоток, характеризующего степень насыщенности межвитковых полостей пропиточным составом. Это достигается за счет того, что по завершении пропитки в обмотку подается греющий ток, магнитное поле которого служит своеобразным затвором, с его помощью пропиточный состав прекращает вытекать из полостей обмотки при их сушке. Высокая теплопроводность предлагаемой смеси и высокие коэффициенты пропитки позволяют снизить перегрев обмоток при их эксплуатации, что в несколько раз повышает их эксплуатационную надежность и долговечность. Показано, что введение в компаунд КП-34 никель-цинковых магнитомягких частиц позволяет повысить теплопроводность пропиточной смеси более чем в полтора раза. При этом технологические свойства магнитоэлектрической смеси (вязкость, электрическая прочность и др.) остаются в допустимых пределах. Более высокая теплопроводность рассматриваемой магнитоэлектрической смеси, по сравнению с теплопроводностью компаунда КП-34, традиционно используемого для струйно-капельной пропитки статорных обмоток, а также высокие коэффициенты пропитки при использовании магнитоэлектрического состава дают возможность снизить перегрев обмоток статоров не менее чем на 30 %.

**Ключевые слова:**

Магнитоэлектрический компаунд, ток, пропиточный компаунд, пропитка, теплопроводность, вязкость, магнитное поле.

## Введение

К намоточным изделиям электротехнической и радиотехнической промышленности относятся электрические машины, трансформаторы, дроссели, сельсины, катушки индуктивности, фильтры, преобразователи и др.

Среди перечисленных намоточных изделий наиболее распространенным видом являются электрические машины. Этот вид продукции используется практически во всех сферах деятельности и быта человека. Факт широчайшего распространения данного вида изделий наглядно подтверждают цифры, показывающие потребление ими электрической энергии. Подсчитано, что только на долю асинхронных электродвигателей общепромышленного применения в Российской Федерации приходится 50 % всей вырабатываемой электроэнергии, а в США – 64 %. Самым ненадежным узлом электрической машины является изоляция обмоток электрических машин. По современным данным, на долю обмоток асинхронных электродвигателей приходится 95–98 % от общего количества отказов, причем на межвитковую изоляцию приходится 93 %, на межфазную – 5 % и на корпусную – 2 % всех отказов обмоток [1]. При этом убытки обусловлены не только большими затратами на ремонт или замену отказавших электродвигателей, составляющими около 80 % стоимости годового выпуска электрических машин, но и от простоя оборудования, в котором была задействована отказавшая электрическая машина [2]. Низкая надежность изоляции обмоток электрических машин во многом зависит от качества изоляции обмоточного провода, от намоточного оборудования и технологии пропитки. Именно в процессе пропитки обмоток пленкой пропиточного состава скрываются дефекты в витковой, межфазной и корпусной изоляции. В результате повышаются не только электроизоляционные свойства обмоток, но и их теплопроводность, влагостойкость, монолитность и другие характеристики, обеспечивающие надежность изоляции обмоток.

Все эти качественные изменения свойств обмотки после пропитки связаны с физическими свойствами самого пропиточного состава, а также с количеством этого состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции компаундирования (сушки). Потому вопрос о совершенствовании пропиточных составов и технологии пропитки обмоток весьма актуален.

## Расчетная часть

Надежность и долговечность обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий зависит от многих факторов, одним из которых является уровень рабочей температуры обмоток в процессе их эксплуатации. Величина перегрева обмоток в процессе эксплуатации намоточных изделий определяется рядом технологических факторов, в частности от эквивалентной теплопроводности обмотки и её теплового сопротивления на

границе обмотка – магнитный сердечник. Значение этих показателей, в свою очередь, зависит от теплопроводности пропиточного состава и степени заполнения этим составом межвитковых и корпусных полостей обмотки. При этом, чем выше теплопроводность пропиточного состава и больше степень заполнения им межвитковых и корпусных полостей обмотки, тем лучше осуществляется из неё теплоотвод в магнитный сердечник и в окружающую среду, тем ниже рабочая температура обмотки и выше срок её службы.

Во всех известных технологиях пропитки намоточных изделий используются лаки и компаунды, которые обладают относительно малой теплопроводностью. Поэтому чаще всего для более существенного повышения указанного параметра используют модификацию лаков и компаундов при помощи разных наполнителей [3].

При использовании компаундов с наполнителями, например кварцем или нитридом бора, теплопроводность электрической смеси возрастает, однако это приводит, как правило, к значительному ухудшению качества пропитки и снижению производительности труда [3].

Для того чтобы повысить теплопроводность обмотки электротехнического изделия и добиться высоких коэффициентов пропитки с сохранением электрической прочности витковой и корпусной изоляции, к пропиточному составу с наполнителями должны быть предъявлены следующие требования:

- в состав композитной смеси, кроме связующего компаунда, должен входить порошок наполнителей, позволяющий заметно повысить теплопроводность смеси по сравнению с теплопроводностью лака;
- смесь, для улучшения качества пропитки, должна взаимодействовать с магнитным полем обмотки пропитываемого изделия, которое создается во время его разогрева электрическим током. Поскольку все пропиточные лаки обладают магнитной проницаемостью  $\mu=1$ , необходимое взаимодействие должно создаваться за счет магнитных свойств порошка наполнителя;
- для получения максимальной теплопроводности состава допускается вводить в него дополнительно порошок металла в количествах, не приводящих к снижению электрической прочности ниже допустимого значения;
- для улучшения тепловой совместимости обмотки с другими элементами изделия необходимо, чтобы поверхность пропиточного изделия обладала достаточной отражающей способностью.

С учетом предъявленных требований был предложен состав пропиточной смеси, в которую входит пропиточный терморреактивный лак КП-34, мелкодисперсный порошок магнитомягкого феррита М400НН и пудра алюминия АЛ-9 [4–7].

Работы [4–7] стимулировали разработку магнитодиэлектрических составов и их применение в иных перспективных областях деятельности чело-

века. Авторы работы [8] предположили, что магнитоэлектрические составы на основе никель-цинковых порошков могут найти широкое применение в устройствах, использующих или создающих сопутствующее электромагнитное излучение сверхвысокочастотного диапазона для решения возникающих в связи с этим проблем, таких как экологическая защита биологических объектов от его вредного воздействия, подавление помех средствам связи, обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, предотвращение утечек информации по радиоканалу и т. п. Отдельный интерес представляет разработка технологии снижения заметности «стелс», предназначенной для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника.

Подробная информация об исследованиях композитных составов на основе никель-цинковых ферромагнитных частиц изложена в работах [9–16].

Применение порошка никель-цинкового феррита в пропиточных составах придает им магнитные свойства и повышает теплопроводность, а присутствие алюминиевой пудры обеспечивает снижение степени черноты поверхности пропиточного элемента и дополнительно приводит к повышению теплопроводности состава. В то же время улучшается теплопроводность смеси, поскольку коэффициент теплопроводности у феррита в двадцать раз, а у алюминия на три порядка выше, чем у пропиточного компаунда.

Оценим эквивалентную теплопроводность намоточного изделия на примере индуктивного элемента (ИЭ). Подробные методики исследования магнитоэлектрических составов известны и подробно описаны в работах [17, 18]. Об эффективности использования магнитоэлектрических составов для силовых кабелей отмечено в работах [19–21]. Авторы показали эффективность при использовании указанных составов на кабелях, где второй экран выполнен из электропроводящей сшитой полимерной композиции, магнитоэлектрический экран в виде полимерной ленты с ферромагнитным мелкодисперсным наполнителем (размер частиц от 0,2 до 50 мкм), наложенной методом обмотки.

Определяющим параметром пропитки, как это было отмечено выше, является снижение перегрева ИЭ в рабочем режиме. Поэтому необходимо добиться не только наиболее полного заполнения пустот обмотки пропиточным составом, но и также, чтобы этот состав обладал максимальной теплопроводностью.

Очевидно, изменение температуры перегрева внутренних слоев ИЭ будет пропорционально изменению теплового потока от внутренних слоев к внешним.

Удельный тепловой поток через обмотку будет определяться следующим выражением:

$$q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}(T_{\text{в1}} - T_{\text{в2}})}{d_{\text{СТ}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{в1}}$ ,  $T_{\text{в2}}$  – температуры внешних поверхностей стенки,  $T_{\text{в1}} > T_{\text{в2}}$ ;  $d_{\text{СТ}}$  – толщина стенки;  $\lambda_{\text{ЭКВ}}$  – теплопроводность стенки, в нашем случае обмотки ИЭ.

Изменения теплового потока через обмотку после пропитки определяется как

$$\Delta q = q_2 - q_1, \quad (2)$$

где  $q_1$  – тепловой поток через непропитанную обмотку;  $q_2$  – тепловой поток через пропитанную обмотку.

$$\Delta q = \frac{(\lambda_{\text{ЭКВ1}} - \lambda_{\text{ЭКВ2}})(T_{\text{в1}} - T_{\text{в2}})}{d_{\text{СТ}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{ЭКВ1}}$ ,  $\lambda_{\text{ЭКВ2}}$  – эквивалентные теплопроводности обмотки до и после пропитки.

Определим относительное изменение теплового потока:

$$q_{\text{отн}} = \frac{\Delta q}{q_1}. \quad (4)$$

Подставляя (1) и (3) в (4), получим:

$$\delta q_{\text{отн}} = \frac{(\lambda_{\text{ЭКВ2}} - \lambda_{\text{ЭКВ1}})}{\lambda_{\text{ЭКВ1}}}. \quad (5)$$

Эквивалентную теплопроводность обмотки определим по формуле

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda_{\text{н}}^{\circ} \left\{ \left[ \arcsin \frac{-0,82 + 0,89(d/d_{\text{н}})\sqrt{k_3}}{0,95 - 0,77(d/d_{\text{н}})k_3} + 1,57 \right] \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0,86(d/d_{\text{н}})^2 k_3}} - 0,9 \right\}, \quad (6)$$

где  $d$ ,  $d_{\text{н}}$  – диаметры голого и изолированного провода;  $k_3$  – коэффициент заполнения «по квадратам»;  $\lambda_{\text{н}}^{\circ}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_{\text{н}}^{\circ} = \frac{\delta_{\text{н}} + \delta_{\text{в}}}{\delta_{\text{н}}/\lambda_{\text{н}} + \delta_{\text{в}}/\lambda_{\text{вЭКВ}}}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\text{н}}$  – двусторонняя толщина изоляции провода;  $\delta_{\text{в}}$  – толщина воздушных промежутков между проводами для шахматной укладки:

$$\delta_{\text{в}} = 0,5d_{\text{н}} [1 - 0,5\sqrt{4 - (d/d_{\text{н}})^2}], \quad (8)$$

где  $\lambda_{\text{н}}$ ,  $\lambda_{\text{вЭКВ}}$  – коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев.

$$\lambda_{\text{вЭКВ}} = \frac{2\lambda_{\text{в}}\lambda_{\text{н}}[\lambda_{\text{н}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{в}}(1 - k_{\text{н}})]}{\lambda_{\text{в}}\lambda_{\text{н}} + \left[ \begin{array}{l} [\lambda_{\text{н}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{в}}(1 - k_{\text{н}})] \times \\ \times [\lambda_{\text{в}}k_{\text{н}} + \lambda_{\text{н}}(1 - k_{\text{н}})] \end{array} \right]}, \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\lambda_{\text{н}}$  – коэффициенты теплопроводности воздуха и пропиточного состава;  $k_{\text{н}}$  – коэффициент пропитки.

Коэффициент теплопроводности пропиточного состава  $\lambda_{\text{н}}$  определяется следующим выражением [22]:

$$\lambda_{\text{н}} = \lambda_{\text{св}} \left[ 1 - \frac{K_{V_{\text{н}}}}{1 / (1 - \lambda_{\text{н}} / \lambda_{\text{св}}) - (1 - K_{V_{\text{н}}}) / 3} \right], \quad (10)$$

где  $\lambda_{\text{св}}$  – коэффициент теплопроводности связующего материала;  $\lambda_{\text{н}}$  – коэффициент теплопроводности наполнителя;  $K_{V_{\text{н}}}$  – объемная концентрация наполнителя в пропиточном составе.

Аналогичный расчет эквивалентной теплопроводности можно реализовать для любых обмоток намоточных изделий.

Объемная концентрация наполнителя в пропиточном составе, оставшемся в обмотке после ее сушки, определяется многими факторами и в первую очередь адгезией пропиточного лака на поверхности частиц феррита. Адгезия лака зависит от величины краевого угла смачивания, коэффициента поверхностного натяжения и многих других факторов, расчет которых затруднен вследствие малых размеров частиц и их сложной формы.

Поэтому целесообразно поставить ряд экспериментов по определению зависимости содержания наполнителя в отвержденной смеси от первоначального пропиточного состава и напряженности магнитного поля при пропитке.

#### Экспериментальная часть

На качество пропитки обмоток оказывают влияние ряд физических параметров пропиточных составов. Для определения этих параметров необходимо экспериментально исследовать следующие зависимости:

- а) теплопроводности материала от концентрации наполнителей;
- б) магнитной проницаемости состава от концентрации феррита;
- в) вязкости от концентрации;
- г) содержания наполнителя в обмотке после сушки от первоначальной его концентрации в смеси;
- д) электрической прочности материала от концентрации наполнителя.

Для исследований были приготовлены композиции на основе порошка феррита М400НН, алюминиевой пудры и пропиточного терморезактивного компаунда КП-34. Составы композиций приведены в табл. 1. Составы 7–13 использовались для проведения эксперимента только по пунктам (а, д).

Для того, чтобы никель-цинковые частицы и частицы алюминиевой пудры свободно проходили в межвитковые полости, необходимо, чтобы размер  $d_{\text{ч}}$  зерна никель-цинковых частиц и частиц зерна алюминиевой пудры был много меньше диаметра  $d_{\text{кан}}$  межвитковых полостей. Проведенные нами оценки показали, что это условие удовлетворяется при выполнении неравенства  $d_{\text{ч}} \ll d_{\text{кан}}$ . В наших опытах размер ферромагнитных частиц и частиц алюминиевой пудры удовлетворял упомянутому неравенству при размерах диаметра частиц  $d_{\text{ч}} \leq 2$  мкм.

Подготовка смесей компаунда с ферромагнитными и алюминиевыми частицами осуществля-

лась путем предварительного взвешивания всех компонентов, в высыпании взвешенных частей ферромагнитных и алюминиевых частиц в КП-34 и в тщательном перемешивании полученного состава до образования однородной массы.

Таблица 1. Состав магнитоэлектрической смеси

Table 1. The composition of the magnetodielectric mixture

№ состава Composition	Содержание КП-34, вес. % CP-34 content, wt. %	Содержание феррочастиц, вес. % Ferrite particles content, wt. %	Содержание алюминиевой пудры, вес. % Aluminum powder content, wt. %	Объемная доля феррочастиц, P Ferrite particles volume ratio, P	Объемная доля алюминиевой пудры, P Aluminum powder volume ratio, P
1	80	20	-	0,077	-
2	70	30	-	0,096	-
3	60	40	-	0,16	-
4	50	50	-	0,25	-
5	40	60	-	0,33	-
6	30	70	-	0,45	-
7	30	68	2	0,44	0,024
8	30	67	3	0,41	0,04
9	30	65	3	0,37	0,064
10	30	60	10	0,33	0,13
11	67	30	3	-	0,04
12	65	30	5	-	0,064
13	60	30	10	-	0,13
14	100	-	-	-	-

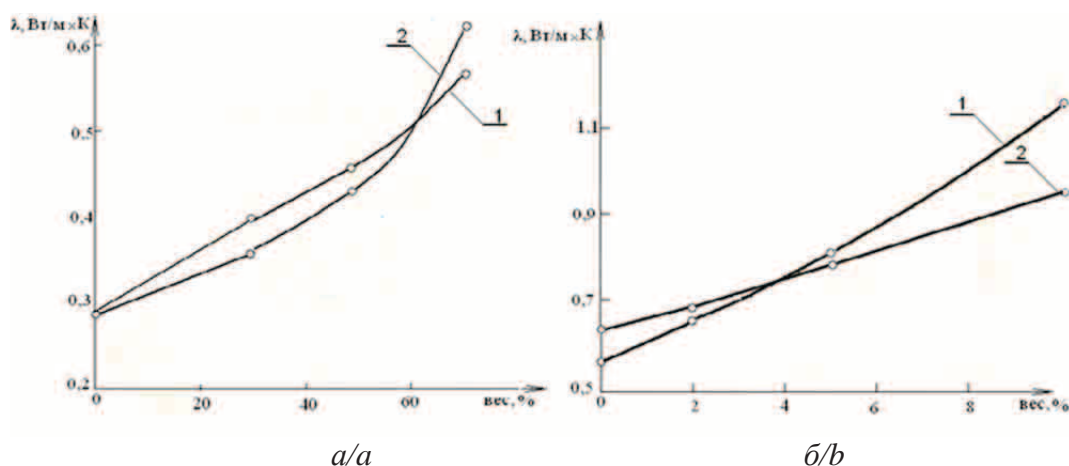
Для опытного определения коэффициента теплопроводности различных материалов существуют способы абсолютные и относительные. Для нашего случая выбираем последний метод. Он основан на измерении разности температур между концами образца при установившемся тепловом потоке. Этот метод, предложенный Христиансенем [3], состоит в следующем.

Между нагревателем с температурой  $T_1$  и холодильником с температурой  $T_3$  помещен испытуемый образец и эталон в виде пластинок одинакового поперечного сечения.

Для обеспечения надежных тепловых контактов между нагревателем, образцом, эталоном и холодильником предусматриваются металлические прокладки. Температура прокладок между образцом и эталоном  $T_2$  измеряется термометром. Прибор окружается теплоизоляцией. Об установившемся тепловом потоке можно судить по стабилизации показаний термометра во времени. Нагревающей средой является кипящая вода, а охлаждающей – лед, так что  $T_1=100$  °С,  $T_3=0$  °С. В качестве эталонной была взята пластинка отвержденного компаунда КП-34. Теплопроводность испытуемого материала определялась по формуле

$$\lambda_{\text{н}} = \lambda_{\text{э}} \frac{(T_2 - T_3)h_1}{(T_1 - T_2)h_2}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{\text{э}}$  – коэффициент теплопроводности эталона;  $h_1, h_2$  – толщина образца и эталона, в нашем случае  $h_1 > h_2$ .



**Рис. 1.** Зависимость теплопроводности смеси: а) от содержания феррита М400НН; б) от содержания алюминиевой пудры (при концентрации феррита М400НН 60 вес. %). 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

**Fig. 1.** Dependence of thermal conductivity of the mixture: a) on the content of the ferrite MN; b) on the content of aluminum powder (at a concentration of ferrite MN 60 wt. %). 1 – experimental curve; 2 – theoretical curve

По формуле (11) определяется теоретическое значение теплопроводности состава.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 1.

**Таблица 2.** Коэффициент теплопроводности смесей

**Table 2.** The thermal conductivity coefficient of the mixtures

№ состава Composition	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{эксп}), \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{теор}), \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_{\text{э}}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
		$\lambda_{\text{и}}(\text{exper}), \text{W/m}\cdot\text{K}$	$\lambda_{\text{и}}(\text{theor}), \text{W/m}\cdot\text{K}$	
2	59	0,4	0,36	0,28
4	62	0,46	0,43	
6	67	0,57	0,62	
7	70	0,65	0,68	
9	74	0,8	0,77	
10	80	0,12	0,94	

Вязкость масел, лаков, компаундов, применяемых для пропитки изоляции, имеет весьма существенное значение для проведения соответствующих технологических процессов.

Существует несколько различных видов вязкости: динамическая, кинематическая и условная, определяемая в технике упрощенными, условными способами.

Вязкость всех жидкостей, если только они при нагреве не претерпевают химических изменений, заметно уменьшается с повышением температуры. Поэтому при определении вязкости необходимо знать точную величину заданной температуры испытуемой жидкости во время измерения, с этой целью, как правило, приборы снабжаются водяной баней или другими приёмами для создания и поддержания требуемой температуры жидкости.

Определение вязкости производится с помощью вискозиметров. В зависимости от устройства прибора он может служить для измерения либо условной, либо динамической вязкостей, либо для получения значений кинематической вязкости.

В нашем случае определили условную вязкость пропиточных составов. При этом использовали вискозиметр типа ВЗ-246, разработанный для измерения вязкости электроизоляционных лаков. Этот вискозиметр используется для испытания лаков по времени истечения 20–150 секунд.

Вискозиметр ВЗ-246 имеет объем воронки 100 мл, диаметр сопла 4 мм, высоту сопла 4 мм. Воронка заливается до краев испытуемым лаком с температурой 20 °С.

Методика испытания следующая:

- 1) испытуемая жидкость заливается в конусообразную воронку ВЗ-246;
- 2) открывают кран выпускаемого отверстия (сопла);
- 3) измеряют по секундомеру время истечения (в секундах) 100 мл жидкости;
- 4) секундомер останавливают в момент первого появления прерывающейся струи.

Это время принимается за меру вязкости. Результаты измерений приведены в табл. 3 и на рис. 2.

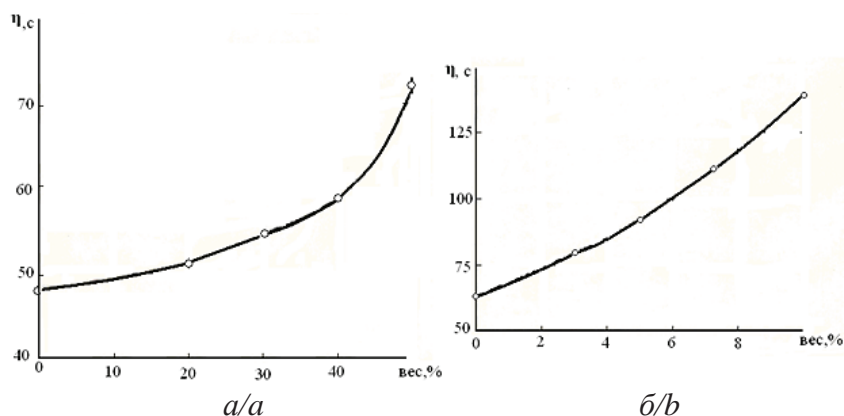
**Таблица 3.** Вязкость смесей

**Table 3.** The viscosity of mixtures

№ состава/Composition	1	2	3	4	11	12	13	14
Вязкость, с/Viscosity, s	51	55	59	72	82	91	140	48

В табл. 3 указаны номера составов, взятые из табл. 1, где для каждого номера указано весовое процентное содержание компаунда КП-34, ферритовых частиц и частиц алюминиевой пудры. Например, состав № 14 – это чистый КП-34, без примесей в нем ферритовых частиц и алюминиевой пудры. Составы 1–4 не содержат алюминиевой пудры, а состоят только из смеси компаунда КП-34 и ферромагнитных частиц, смешанных в разных пропорциях, и т. д.

Как следует из табл. 3, вязкость КП-34 (состав № 14) в исходном состоянии была равна 48 с. При



**Рис. 2.** Зависимость вязкости смеси: а) от содержания феррита М400НН; б) содержания алюминиевой пудры

**Fig. 2.** The dependence of the mixture viscosity: a) on the content of the ferrite MN; b) on the content of aluminum powder

добавлении в КП-34 ферромагнитных частиц и алюминиевой пудры вязкость смеси, по сравнению с исходным компаундом, возрастает.

Из рис. 2 видно, что добавка алюминиевой пудры, даже в незначительных количествах, приводит к резкому увеличению вязкости состава, поэтому добавлять в смесь более 5 вес. % алюминиевой пудры нецелесообразно.

Для изучения магнитных свойств смеси из неё были изготовлены кольца. После запекания колец, изготовленных из той или иной смеси, проводился контроль их геометрических размеров, затем на каждое кольцо наматывали по 32 витка провода диаметром 0,86 мм марки ПЭВШО-2 и измеряли индуктивность  $L$  намотанной на кольцо катушки. Расчет начальной магнитной проницаемости магнитного сердечника из соответствующей смеси  $\mu$  осуществлялся по формуле

$$\mu = \frac{Ll_c}{\mu_0 w^2 Q_c}, \quad (12)$$

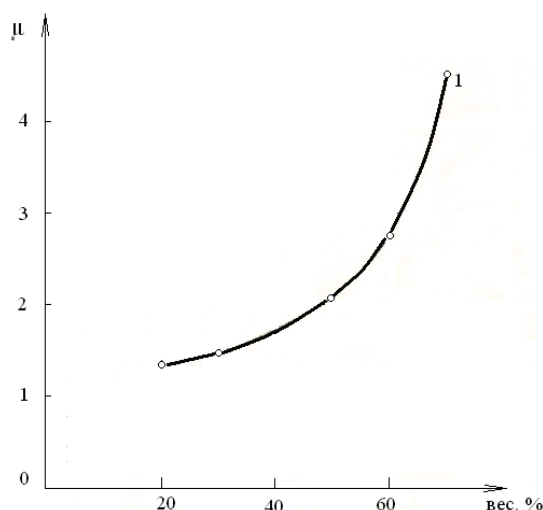
где  $L$  – индуктивность, Гн;  $w$  – число, витков;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $l_c$  – средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе, м;  $Q_c$  – площадь поперечного сечения магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $D$  – внешний диаметр магнитного сердечника, м;  $d$  – внутренний диаметр магнитного сердечника, м;  $h$  – толщина магнитного сердечника, м.

Если в формулу (12) подставлять значения  $L$  (мкГн), среднюю длину магнитной силовой линии в магнитопроводе  $l_c$  (мм), а площадь поперечного сечения магнитопровода  $Q_c$  (мм<sup>2</sup>), то можно получить более удобную для вычисления формулу:

$$\mu = \frac{796Ll_c}{w^2 Q_c}. \quad (13)$$

Все изготовленные магнитные сердечники имели одинаковые размеры:  $D \cong 24$  мм;  $d \cong 14,8$  мм;  $h \cong 7$  мм.

Результаты расчетов и измерений представлены в табл. 4 и на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость магнитной проницаемости смеси от содержания феррита М400НН

**Fig. 3.** The dependence of the magnetic permeability of the mixture on ferrite content M400NN

Измерения проводились на частоте  $f=100$  кГц. Из рис. 3 видно, что магнитная проницаемость смеси растет практически экспоненциально с увеличением концентрации ферромагнитных частиц.

**Таблица 4.** Магнитная проницаемость смеси

**Table 4.** The magnetic permeability of the mixture

№ состава Composition	Индуктивность, мкГн Inductivity, mH	Относительная магнитная проницаемость Relative magnetic permittivity	
		теоретическая theoretic	экспериментальная experimental
1	0,94	1,25	1,31
2	1,1	1,32	1,46
3	1,4	1,99	2,1
4	1,9	2,46	2,79
5	6,1	4,0	4,55

Испытание магнитоэлектрических составов на электрическую прочность осуществлялось следующим образом. На двух отрезках провода в эмалированной изоляции, друг против друга, наносились круговые дефекты длиной 5 мм. Провода скреплялись вместе отрезками полихлорвиниловой трубки. Около десяти подготовленных таким образом пар собирались в пакет и помещались в стеклянную пробирку. При помещении проводов в стеклянные трубки дефекты каждой из пар проводов смещались по длине трубки относительно дефектов остальных пар. Каждая пара нумеровалась. После размещения всех пар макетов в стеклянные трубки последние разогревались до температуры 110–120 °С и пропитывались струей смеси. Далее производилась сушка при температуре 160–170 °С. После сушки поочередно проводились испытания на пробой изоляции для каждой пары макетных образцов путем подачи между ними высокого постоянного напряжения, которое поднималось со скоростью 1 кВ/с. Величина пробоя для каждой пары регистрировалась. Результаты эксперимента приведены в табл. 5 и на рис. 4.

**Таблица 5.** Пробивное напряжение образцов

**Table 5.** The breakdown voltage of samples

№ состава Composition	2	6	7	8	9	10	12	14
Среднее пробивное напряжение, кВ Average breakdown voltage, kV	3,8	2,1	1,7	0,9	0,6	0	0,6	4,0

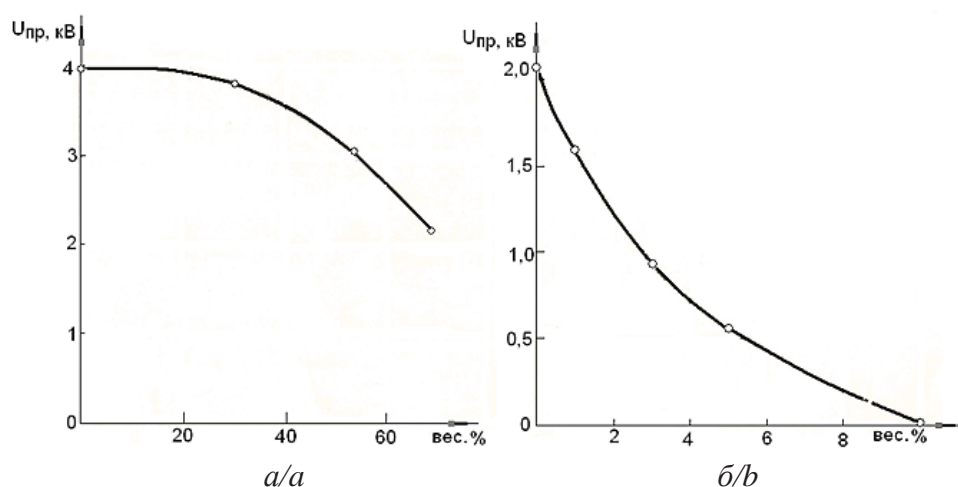
Графики, приведенные на рис. 4, и значения пробивных напряжений пленок соответствующих составов, приведенные в табл. 5, отражают тенденцию, показывающую характер изменения пробивного напряжения пленок в зависимости от компонентного содержания составов. Для более точного определения влияния ферритовых добавок на электрическую прочность был проведен эксперимент на

образцах, изготовленных по ГОСТ 2256–59. Испытания, во избежание разряда по поверхности образцов, проводилось в трансформаторном масле. Пробивное напряжение образцов определялось при плавном подъеме на установке УПУ-1М. Для образцов, изготовленных из пропиточной смеси, содержащей 30 % массовых долей феррита (состав № 2), пробивная напряженность составляла 35–45 кВ/мм. Такую же электрическую прочность имели образцы, изготовленные из чистого компаунда КП-34 (состав № 14).

Для исследования зависимости содержания феррита в пропитанной обмотке от первоначальной концентрации смеси и напряженности магнитного поля вокруг проводов обмотки при пропитке были изготовлены торроидальные обмотки без сердечника, содержащие по 47 витков провода марки ПЭВ диаметром 0,8 мм в один слой. Через обмотки, помещенные в пропиточный состав, пропускали ток. Под действием образовавшегося магнитного поля ферромагнитные частицы втягивались внутрь обмотки и удерживались там. После извлечения обмотки из смеси ток не отключался и созданное им магнитное поле продолжало действовать на ферромагнитные частицы, препятствуя вытеканию пропиточного состава из обмотки. Излишним пропиточного состава давали стечь и производили сушку обмотки. В результате внутри обмотки образовывался сердечник из отвержденной массы пропиточного состава. У освобожденного от провода сердечника измерялась масса и объем. Таким образом, были получены зависимости этих величин от концентрации пропиточного состава и напряженности магнитного поля. Определение концентрации феррита в удержанной в обмотке смеси рассчитывался по формуле

$$K_{\phi} = \frac{\rho_{\phi}\rho_{\pi}(m_{\pi} / \rho_{\pi} - V_{\pi})}{(\rho_{\pi} - \rho_{\phi})m_{\pi}}, \quad (14)$$

где  $m_{\pi}$  – масса полученного сердечника;  $V_{\pi}$  – его объем;  $\rho_{\phi}$ ,  $\rho_{\pi}$  – плотности феррита и компаунда.



**Рис. 4.** Зависимость пробивного напряжения от содержания феррита М400НН в пропиточной смеси (а) и алюминия (б)

**Fig. 4.** The dependence of breakdown voltage on the ferrite content М400НН in the impregnating mixture (a) and aluminum (b)



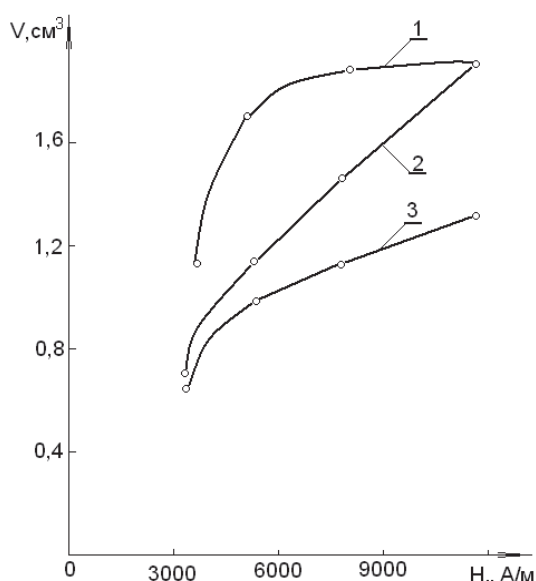
Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 6 и на рис. 5.

**Таблица 6.** Параметры отвержденной смеси

**Table 6.** The parameters of the cured mixture

№ состава Composition	Ток I, A Current I, A	Напряженность магнитного поля H, A/м Magnetic-field intensity M, A/m	Объем $V_n$ , см <sup>3</sup> Volume $V_c$ , cm <sup>3</sup>	$m_n$ , г $m_c$ , g	$K_\phi$ , вес. % $K_i$ , wt. %
1	5	3800			
	7	5350	1,00	2,06	63
	10	7650	1,1	2,65	69
	15	11500	1,3	2,79	66
2	5	3800	0,7	1,63	71
	7	5350	1,1	2,40	66

Из табл. 6 видно, что концентрация феррита в отвержденных образцах из составов 1 и 2 практически не зависит от первоначальной концентрации и напряженности магнитного поля при пропитке. Снижение концентрации  $K_\phi$  для образца из состава 4 объясняется снижением плотности отвержденной смеси вследствие увеличения воздушных включений, поскольку вакуумирование смеси не производится. Исследование полученных образцов на микроскопе МИИ-4 показало, что число воздушных включений уменьшится с уменьшением содержания феррита в смеси.



**Рис. 5.** Зависимость объёма удержанной в обмотке смеси от напряженности магнитного поля для различных концентраций феррита M400НН: 1) 50 вес. %; 2) 30 вес. %; 3) 20 вес. %

**Fig. 5.** The dependence of the volume retained in the mixture winding on the magnetic field for various concentrations of ferrite MN: 1) 50 wt. %; 2) 30 wt. %; 3) 20 wt. %

Из рис. 5. видно, что максимальный объем заполнения обмотки пропиточным составом для различных первоначальных концентраций феррита в смеси достигается при разных напряженностях

магнитного поля, поэтому пользуясь этими зависимостями можно подобрать состав смеси, наиболее полно отвечающий поставленным требованиям при заданной допустимой напряженности поля.

Приведенные выше результаты стимулировали поиск путей совершенствования типовой струйно-капельной технологии пропитки, использующей различные компаунды, в том числе и компаунд КП-34.

Пропитка происходит следующим образом: пропитываемое изделие подключают к источнику тока, с помощью которого происходит разогрев обмотки до температуры, определяемой свойствами применяемого пропиточного лака. Затем изделию придают вращение с некоторой постоянной скоростью, а на лобовую часть обмотки тонкой струей подают пропиточный лак, который, соприкасаясь с нагретыми слоями обмотки, уменьшает вязкость и под действием капиллярных сил проникает внутрь изделия. Вращение необходимо для равномерного заполнения пустот лаком. После завершения пропитки, не прекращая вращения, увеличивают подачу тока через пропитанную обмотку, доводя её температуру до температуры полимеризации лака, и производят сушку.

Основные недостатки типовой струйно-капельной пропитки:

- высокая энергоёмкость, связанная с необходимостью вращения гнезд с закрепленными на них статорными обмотками энергоёмкими электромеханическими устройствами;
- высокий шум, создаваемый вращающимися элементами пропиточной установки;
- относительно низкие коэффициенты пропитки.

Под коэффициентом пропитки понимается отношение объёма сухого остатка пропиточного состава, оставшегося в обмотке после пропитки и сушки, к объёму пор и межвитковых полостей непропитанной обмотки [1].

Относительно низкие коэффициенты пропитки в типовой струйно-капельной пропитке обусловлены тем, что по завершении пропитки в процессе сушки происходит интенсивное вытекание пропиточного состава из обмотки в силу того, что вязкость компаунда при его разогреве на первых порах сушки резко снижается.

Применение предложенного нами магнетодиэлектрического состава, рассмотренного выше, позволяет устранить указанные выше недостатки традиционной технологии. Это достигается за счет того, что струя магнетодиэлектрического пропиточного состава легко управляется магнитным полем индуктора: её можно изгибать, вращать и вибрировать. Это позволяет устранить из типовой струйно-капельной пропитки энергоёмкие, шумящие электромеханические устройства, вращающие пропитываемые статорные обмотки с магнитным сердечником [21–25]. Предлагаемая нами в работе [21] пропитка отличается от типовой струйно-капельной пропитки тем, что обмотка первоначально разогревается током до регламентированной технологической документацией температу-

ры. После этого ток от обмотки отключается, на лобовую часть неподвижной статорной обмотки подается струя магнитоэлектрического состава, изогнутая и вращающаяся магнитным полем с определенной частотой. После завершения пропитки через обмотку вновь начинают пропускать греющий ток. При подводе греющего тока к пропитанной обмотке в ней возникает поперечное магнитное поле, под действием которого происходит упорядоченная ориентация частиц ферромагнитного наполнителя и их жесткая фиксация в межвитковых полостях обмотки. Межвитковые полости «запираются» возникшим электромагнитным затвором, и вытекание пропиточного состава из обмотки прекращается, что приводит к значительному повышению коэффициентов пропитки.

Коэффициенты пропитки в обмотках, пропитанных по типовой и предлагаемой нами технологии, определялись электротепловым способом [1].

После окончательной сушки изделия охлаждаются и отправляют на участок контроля и сборки.

Эксперименты по выявлению возможностей рассматриваемой технологии пропитки с целью повышения коэффициентов заполняемости обмоток пропиточным составом и влияния этих коэффициентов на уровень перегрева обмоток проводились на 12 электродвигателях 4АМ112М4УЗ. Предварительно все 12 непропитанных обмоток электродвигателей исследовались на перегрев. После испытаний все обмотки 12 электродвигателей пропитывались: 6 обмоток – чистым компаундом КП-34, а 6 других – магнитоэлектрическим составом, содержащим 30 мас. % никель-цинкового феррита М400 НН (состав № 2). Магнитные сердечники всех электродвигателей были изготовлены из одной и той же стали, на одном штампе. Обмотки наматывались на одном и том же обмоточном станке из провода одной партии

Все статоры до пропитки взвешивались. По результатам взвешивания определялись масса пропиточного состава, оставшегося в обмотках после пропитки и сушки, и усредненные коэффициенты заполняемости обмоток составом. Для повышения достоверности коэффициенты пропитки определялись дополнительно электротепловым методом [24, 25]. Под коэффициентом пропитки  $K_{инп}$  понималась величина отношения массы  $m_{св}$  сухого пропиточного состава, оставшегося в межвитковых полостях  $i$ -й контролируемой обмотки, к предельной массе того же сухого пропиточного состава  $m_0$ , которую можно разместить в межвитковых полостях обмотки. О том, как определить обе указанные величины, подробно изложено в работах [1, 24, 25]. Результаты измерения коэффициентов пропитки обмоток всех 12 статоров приведены в табл. 7.

Из табл. 7 следует, что пропитка обмоток электродвигателей магнитоэлектрическим композиционным составом позволила повысить коэффициент пропитки, по сравнению с традиционной струйно-капельной пропиткой чистым компаундом КП-34, в среднем в 1,4 раза (с 0,6 до 0,84).

**Таблица 7.** Коэффициенты пропитки обмоток испытуемых статоров

**Table 7.** The coefficients of windings impregnation of the subjects stators

$K_{инп}$ при пропитке компаундом КП-34 $K_{wi}$ when impregnated with КП-34 compaund						$K_{инп}$ при пропитке составом № 2 $K_{wi}$ when impregnated with no. 2 compaund					
0,61	0,59	0,6	0,58	0,59	0,63	0,86	0,82	0,84	0,84	0,85	0,83

После пропитки и сушки обмоток электродвигателей они вновь подвергались испытанию на нагрев в продолжительном номинальном режиме работы. Превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды определяли методом сопротивления.

Было установлено, что пропитка обмоток электродвигателей компаундом КП-34 приводит в среднем к снижению перегрева обмоток на величину 6,3 °С, в то время как пропитка обмоток магнитоэлектрическим составом привела в среднем к снижению уровня перегрева обмоток на 8,3 °С. Таким образом, предлагаемая нами пропитка обмоток электродвигателей магнитоэлектрическим составом привела к снижению перегрева обмоток статоров, по сравнению с типовой струйно-капельной пропиткой, в среднем на 31 %.

#### Результаты и их обсуждение

Из всего количества полученных во время эксперимента зависимостей наибольший интерес представляет зависимость объема удержанной смеси в полостях обмотки после пропитки от напряженности магнитного поля и начального содержания наполнителя в пропиточном составе (рис. 2).

Из представленной зависимости можно заключить, что при использовании состава № 4 возможно добиться полного заполнения пустот при значительно меньшей напряженности магнитного поля, чем при использовании составов № 1 и 2. Однако состав № 4 обладает значительно большей вязкостью, поэтому время пропитки этим составом будет больше. К тому же при использовании этого состава в отвержденной смеси присутствует большее количество воздушных включений, что уменьшает общую плотность массы, а следовательно, и ее теплопроводность. Наиболее плотная масса получается при использовании состава № 1, но для полного заполнения полостей обмотки пропиточным составом в этом случае необходима большая напряженность магнитного поля, которая не всегда достижима из-за ограничения возможного максимального тока через обмотку. Из эксперимента видно, что содержание феррита в отвержденной смеси практически не зависит от начального компонентного состава и от напряженности поля при пропитке и составляет примерно 68 вес. %.

Присутствие алюминия в смеси дает значительное увеличение её теплопроводности (рис. 3), снижает степень черноты поверхности ИЭ примерно до 0,3, что способствует уменьшению теплового влияния ИЭ на другие элементы схемы.

При изучении зависимости пробивного напряжения от состава смесей (рис. 4) были сделаны следующие выводы:

1. Присутствие порошка феррита в пропиточном составе незначительно влияет на величину пробивного напряжения.
2. Добавление алюминия в пропиточный состав приводит к резкому снижению его пробивного напряжения (рис. 4), а при концентрации алюминия более 10 вес. % – к короткому замыканию, т. е. смесь становится проводящей. Поэтому присутствие алюминиевой пудры в пропиточном составе допустимо только в небольших количествах (не более 3 вес. %) и только при пропитке ИЭ, работающих на низких напряжениях.

В результате анализа эксперимента в качестве оптимальных для пропитки являются смеси № 2 и 11, имеющие в своем составе алюминиевую пудру. Эти составы при относительно малой вязкости требуют для качественной пропитки сравнительно малую напряженность поля и после отверждения пропиточного состава дают массу с небольшой пористостью.

#### Заключение

Рассмотренный в статье магнитодиэлектрический состав имеет ряд технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с обычными компаундами, применяемыми для пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических намоточных изделий. Однако преимущества предлагаемого магнитодиэлектрического состава наи-

более ощутимы при его использовании для пропитки обмоток электрических машин струйно-капельным методом. Об этом, в частности, свидетельствуют полученные нами патенты [5–7]. Применение магнитодиэлектрического состава в данном виде пропитки позволяет, во-первых, устранить все энергоёмкие, шумящие электромеханические устройства, при помощи которых обмотки вращаются под падающей на лобовые части обмоток струей пропиточного состава, так как струю можно изгибать и вращать вдоль лобовой части пропитываемых обмоток вращающимся электромагнитным полем. Для более равномерного полива лобовых частей струю можно вибрировать модуляцией вращающегося магнитного поля [21]. По завершении пропитки в обмотку подаётся греющий ток, магнитное поле которого служит своеобразным затвором, с помощью которого пропиточный состав прекращает вытекать из полостей обмотки при их сушке. Это способствует значительному увеличению коэффициента пропитки обмоток. Кроме того, по завершении пропитки можно осуществлять «обволакивание» лобовых частей обмоток упомянутым магнитодиэлектрическим составом, если в процессе токовой сушки обмоток продолжать поливать лобовые части предлагаемым составом [6]. Высокая теплопроводность предлагаемой смеси и высокие коэффициенты пропитки позволяют снизить перегрев обмоток при их эксплуатации, что в несколько раз повышает их эксплуатационную надежность и долговечность.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания «Наука».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Томского государственного университета, 1990. – 192 с.
2. Голдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного назначения. – М.: Знание, 1976. – 55 с.
3. Борисенко А.И., Костинов О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
4. Смирнов Г.В., Хасанов О.Л., Полисадова В.В. Магнитодиэлектрический компаунд с добавками УДП порошка Zn-Ni для улучшения свойств обмоток электротехнических изделий // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6/2. – С. 291–296.
5. Способ изготовления обмотанных магнитопроводов: авторское свидетельство СССР № 1246257; заявл.11.04.84; опубл. 23.07.86, Бюл. № 27. – 5 с.
6. Способ капсулирования обмоток электродвигателей: авторское свидетельство СССР № 1399859; заявл.07.04.86; опубл. 30.05.85, Бюл. № 20. – 3 с.
7. Способ пропитки обмоток электротехнических изделий: пат. Рос. Федерация № 2467452; заявл. 01.04.11; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. – 4 с.
8. Дульнев Г.И., Зарытк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиций материалов. – Л.: Энергия, 1984. – 186 с.
9. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние микроstructures на свойства радиопоглощающих никель-цинковых ферритов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2010. – № 4. – С. 18–22.
10. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2011. – № 2. – С. 33–37.
11. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов // Российская микроразработка. – 2012. – Т. 41. – № 8 – С. 31–35.
12. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние микроstructures на радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов // Российская микроразработка. – 2011. – Т. 40. – № 8. – С. 574–577.
13. Андреев В.Г., Костишин В.Г., Вергазов Р.М. Перспективные радиопоглощающие материалы на основе наноструктурных никель-цинковых ферритов // Тезисы международной объединенной конференции «Кристаллофизика 21 века» и НКРК-2010. – М., 2010. – Т. 2. – С. 328–331.
14. Летюк Л.М., Балбашов А.М., Крутогин Д.Г. Технология производства материалов магнитоэлектроники. – М.: Металлургия, 1994. – 416 с.
15. Летюк Л.М., Костишин В.Г. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. – М.: МИСИС, 2005. – 351 с.
16. Способ пропитки обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2510564; заявл.18.07.12; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 9. – 6 с.
17. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. – М.: Наука и основы технологии, 2009. – 736 с.
18. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов. – М.: Профессия, 2005. – 280 с.

19. Гордиенко В.П., Мустяца О.Н., Сальников В.Г. Влияние дисперсности частиц неорганической добавки на структуру и свойства линейного полиэтилена // Пластические массы. – 2007. – № 12. – С. 11–13.
20. Рамазанов М.А., Керимли С.Дж., Садыхов Р.З. Влияние постоянного магнитного поля на прочностные, диэлектрические и магнитные свойства композиций на основе полимеров и ферромагнетиков // Пластические массы. – 2005. – № 10. – С. 5–6.
21. Ragaini S.R., Tarule A.N. Dielectric and magnetoelectric properties in magnetodielectrics CMFO-SBN-composites // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – V. 39. – Iss. 8. – С. 331–341.
22. Фанг И., Ванг Л.И., Сонг И.П. Действие магнитного поля на диэлектрическую постоянную и электрическую поляризацию  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$  // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 15. – С. 98–129.
23. Морченко А.Т., Панина Л.В., Подгорная С.В. Свойства магнитодиэлектрических композитов в эффективной среде // Журнал нано- и электронной физики. – 2014. – Т. 6. – № 3. – С. 73–79.
24. Способ контроля качества пропитки обмоток электротехнических изделий: пат. Рос. Федерация № 22503116; заявл. 30.05.12; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 7 с.
25. Способ определения коэффициента пропитки отверждаемым полимерным составом обмоток электрических машин: пат. Рос. Федерация № 2521439; заявл. 20.04.14; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 22. – 5 с.

Поступила 13.10.2015 г.

UDC 621.315.6(088.8)

## THE APPLICATION OF MAGNETO-DIELECTRIC COMPOSITE MIXTURE FOR ALTERNATIVE TECHNOLOGY OF WINDING IMPREGNATION IN ELECTRICAL AND RADIO ENGINEERING PRODUCTS

**Gennadiy V. Smirnov,**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Oleg L. Khasanov,**

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

**Dmitriy G. Smirnov,**

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634045, Russia. E-mail: smirnov@main.tusur.ru

**Valentina V. Polissadova,**

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

**Mariya S. Petyukevich,**

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

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need to improve the technology of winding impregnation to increase its quality and reliability.

**The main aim of the study:** to justify the choice of magneto-dielectric impregnating compound and perspective of its use for alternative technology of winding impregnation in electrical and radio engineering products.

**The methods used in the study:** the electro-thermal – to estimate heat conductivity and heat capacity; the electro-magnetic – to define the function of mixture magnetic conductivity from concentration of ferrite; the viscometers – to determine impregnating compound viscosity; capacitive – to control the saturation degree of interturn winding hole by impregnating compound; high-voltage – to investigate the electric strength of composition.

**The results.** The authors found out that application of magneto-dielectric compound for impregnating the electrotechnical windings and radio technical coil products in the first place allows to eliminate all power-consuming, noisy electromechanical devices. Secondly, permits to provide the equal glazing of face parts. Thirdly, the using of magneto-dielectric compound allows to improve the saturation degree of interturn winding hole by impregnating compound. This is achieved through heating current supply to coil after the impregnation, magnetic force of which serves as a gate, whereby the impregnating composition stops to flow out of the cavities during their drying. The high thermal conductivity of the proposed mixture and high rates of impregnation can reduce overheating of the windings, which in several times increases their reliability and durability. It was shown, that the nickel-zinc soft magnetic particles can improve the conductivity of the impregnating mixture more than one and a half times. Thus, magneto-dielectric technological properties of the mixture (viscosity, dielectric strength, etc.) remain within acceptable limits. Higher thermal conductivity of the considered magneto-dielectric mixture, in comparison with the thermal conductivity of the compound KP-34, traditionally used for inkjet-drip impregnation of stator windings, as well as high rates of impregnation when using magneto-dielectric composition, make it possible to reduce overheating of the stator windings not less than 30 %.

**Key words:**

Magneto-dielectric composite mixture, current, impregnating compound, impregnation, thermal conductivity, viscosity, magnetic field.

## REFERENCES

- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The insulation of the windings of electrical products]. Tomsk, TSU Publ., 1990. 192 p.
- Goldberg O.D. *Nadezhnost elektricheskikh mashin obshchepromyshlennogo naznacheniya* [Reliability of electrical machines for general industrial use]. Moscow, Znanie Publ., 1976. 55 p.
- Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Okhlazhdenie promyshlennykh mashin* [Cooling of industrial machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 296 p.
- Smirnov G.V., Khasanov O.L., Polisadova V.V. Magnitodielektricheskiy kompaund s dobavkami UDP poroshka Zn-Ni dlya uluchsheniya svoystv obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy [Magnetolectricity compound with additives UDP powder Zn-Ni to improve the properties of the windings of electrical products]. *Izvestiya vuzov. Physics*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 291–296.
- Khristyukov V.G., Smirnov G.V., Shcherb S.H. *Sposob izgotovleniya obmotannykh magnitoprovodov* [The method of manufacturing magnetic cores wrapped]. Patent USSR, no. 1246257, 1986.
- Smirnov G.V., Shcherb S.H. *Sposob kapsulirovaniya obmotok elektrodvigatelye* [Method of encapsulation of electric motors]. Patent USSR, no. 1399859, 1985.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob propitki obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The method of impregnation of windings of electrical products]. Patent RF, no. 2467452, 2012.
- Dulnev G.I., Zarytyak Yu.P. *Teploprovodnost smesey i kompozitsiy materialov* [The thermal conductivity of the mixtures and compositions of materials]. Leningrad, Energiya Publ., 1984. 186 p.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie mikrostruktury na svoystva radiopogloshchayushchikh nikel-tsinkovykh ferritov [Effect of microstructure on the properties of radio-nickel-zinc ferrite]. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki*, 2010, no. 4, pp. 18–22.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na dielektricheskuyu pronitsaemost i radiopogloshchayushchie kharakteristiki nikel-tsinkovykh ferritov [Influence of technological factors on the dielectric constant and the radio-absorbing characteristics of the nickel-zinc ferrite]. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki*, 2011, no. 2, pp. 33–37.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na dielektricheskuyu pronitsaemost i radiopogloshchayushchie kharakteristiki nikel-tsinkovykh ferritov [Influence of technological factors on dielectric permeability and radio-wave absorbing characteristics of nickel-zinc ferrites]. *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 8, pp. 31–35.
- Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G. Vliyanie mikrostruktury na radiopogloshchayushchie svoystva nikel-tsinkovykh ferritov [Effect of the microstructure on the properties of radio-absorbing nickel-zinc ferrites]. *Russian Microelectronics*, 2011, vol. 40, no. 8, pp. 574–577.
- Andreev V.G., Kostishin V.G., Vergazov R.M. Perspektivnye radiopogloshchayushchie materialy na osnove nanostrukturnykh nikel-tsinkovykh ferritov [Prospective radio-absorbing materials on the basis of nanostructured nickel-zinc ferrite]. *Tezisy Mezhdunarodnoy Obedinennoy Konferentsii «Kristallogizika 21 veka» i NKRR-2010* [Proc. of Int. Joint Conf. Crystal physics of the 21st century and NKRR-2010]. Moscow, 2010, vol. 2, pp. 328–331.
- Letyuk L.M., Balbashov A.M., Krutogin D.G. *Tekhnologiya proizvodstva materialov magnitoelektroniki* [The technology of materials for magneto-electronic production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 416 p.
- Letyuk L.M., Kostishin V.G. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektroniki* [Technology of ferrite materials magneto-electricity]. Moscow, MISiS Publ., 2005. 315 p.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob propitki obmotok elektrotekhnicheskikh mashin* [The method of impregnation of windings of electrical machines]. Patent RF, no. 2510564, 2014.
- Shakh V. *Spravochnoe rukovodstvo po ispytaniyam plastmass i analizu prichin ikh razrusheniya* [Reference guide for testing of plastics and analysis of the causes of their destruction]. Moscow, Nauka i osnovy tekhnologii Publ., 2009. 736 p.
- Kryzhanovskiy V.K. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Moscow, Professiya Publ., 2005. 280 p.
- Gordienko V.P., Mustyatsa O.N., Salmikov V.G. Vliyanie dispersnosti chastits neorganicheskoy dobavki na strukturu i svoystva lineynogo polietilena [Effect of particle fineness inorganic additives on the structure and properties of the linear polyethylene]. *Plastics*, 2007, vol. 12, pp. 11–13.
- Ramazanov M.A., Kerimli S.J., Sadykhov R.Z. Vliyanie postoyannogo magnitnogo polya na prochnostnye, dielektricheskie i magnitnye svoystva kompozitsiy na osnove polimerov i ferromagnetikov [Effect of static magnetic field on the strength, dielectric and magnetic properties of compositions based on polymers and ferromagnetic]. *Plastics*, 2005, vol. 10, pp. 5–6.
- Ragaini S.R., Tarule A.N. Dielectric and magnetoelectric properties in magnetodielectrics CMFO-SBN-composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, vol. 39, pp. 331–341.
- Fung I., Wang L.Y., Song I.P. Deystvie magnitnogo polya na dielektricheskuyu postoyannuyu i elektricheskuyu polarizatsiyu  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$  [Effect of magnetic field on dielectric constant and electric polarization  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$ ]. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no.15, pp. 98–119.
- Morchenko A.T., Panina L.V., Podgornaya S.V. Svoystva magnitodielektricheskikh kompozitov v effektivnoy srede [On properties of magneto-dielectric composites in the effective medium approximation]. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 73–79.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob kontrolya kachestva propitki obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [Method of controlling the quality of impregnation of windings of electrical products]. Patent RF, no. 22503116, 2013.
- Smirnov G.V., Smirnov D.G. *Sposob opredeleniya koeffitsienta propitki otverzhaemym polimernym sostavom obmotok elektricheskikh mashin* [Method of determining the coefficient of impregnation curable polymer composition of the windings of electrical machines]. Patent RF, no. 2521439, 2014.

Received: 13.10.2015.

УДК 532.529.2

## О ВЛИЯНИИ ТЕРМОДИФФУЗИИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ ПРИ ОСТЫВАНИИ СТОЛБА БИНАРНОЙ ЖИДКОСТИ

**Глухов Александр Федорович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: glu@psu.ru.

**Демин Виталий Анатольевич,**

д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой теоретической физики Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: demin@psu.ru.

**Третьяков Александр Владимирович,**

магистр II года обучения направления «Физика конденсированного состояния вещества» Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: tretyakovgroup@yandex.ru.

**Актуальность работы** определяется необходимостью расширения фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований в области макроскопических гидродинамических явлений в многокомпонентных жидких молекулярных смесях. Полученные результаты могут найти свое применение в ряде химических технологий, в том числе существенно изменить взгляды на процессы, связанные с глубокой переработкой, прогнозированием и безопасной утилизацией георесурсов.

**Цель работы.** Изучить явление термодиффузионного разделения сложных по составу жидкостей в тонких каналах при самопроизвольном остывании; сопоставить действие различных механизмов переноса – кратковременной тепловой конвекции, диффузии и термодиффузии на процессы перераспределения компонентов в водно-солевых растворах, заключенных в узких полостях. Предпринятое исследование было выполнено для объяснения возникновения существенной вертикальной стратификации разных по плотности компонентов смеси, что для водно-солевых растворов дает заметное изменение солёности среды по высоте канала.

**Методы исследования.** Для достижения поставленных целей использовались экспериментальные и теоретические методы, напрямую имитирующие рассматриваемые процессы: проведено сравнение экспериментальных данных концентрационных проб, взятых в ходе охлаждения и замораживания образцов, с результатами прямого численного моделирования, проведенного методом конечных разностей. Определение температурных полей осуществлялось с помощью метода термометрических измерений. Численная процедура основывалась на полных уравнениях термоконцентрационной конвекции с корректным набором граничных условий.

**Результаты.** Показано, что тепловая конвекция, диффузия и сильная положительная термодиффузия, характерная для водно-солевых растворов, могут привести к заметному продольному разделению жидких смесей в тонких вертикальных каналах при самопроизвольном остывании и последующем замерзании. В основе объяснения неожиданно сильного перераспределения компонентов лежит совместное синхронное действие двух специфических механизмов: термодиффузионного вытеснения примеси в пограничные слои к боковым стенкам столба жидкости и медленного крупномасштабного продольного конвективного течения. Подобные явления могут иметь место в искусственных гидрологических системах, реальных геологических процессах и технологических приложениях.

### **Ключевые слова:**

Жидкие бинарные смеси, нормальная термодиффузия, конвективный перенос, разделение компонентов.

### **Введение**

В неравномерно нагретых многокомпонентных жидких смесях неоднородности концентрации возникают за счет различных механизмов переноса, что может, например, заметно отражаться на последующем строении твердого массива при замерзании жидкости. Диффузионные процессы применяются в химической кинетике и технологии регулирования химических реакций, играют ключевую роль в ходе испарения и конденсации жидкостей. Так, известно, что для улучшения и изменения физико-химических свойств керамики используют метод диффузион-

ной сварки. Согласно технологической схеме диффузионной сварки и прессования керамики процесс образования сварного соединения происходит вследствие растворения керамики с образованием твердых растворов ее элементов в свариваемом металле.

В жидких средах среди механизмов переноса можно выделить главные, практически всегда присутствующие в ходе рассматриваемых процессов, – это диффузия и конвекция. Применительно к бинарным жидкостям указанные механизмы переноса учитываются следующим уравнением для концентрации примеси [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)C = D\Delta C,$$

где  $C$  – массовая концентрация примеси в объеме жидкости;  $D$  – коэффициент диффузии;  $V$  – скорость элемента жидкости. Выписанное уравнение может быть представлено в обобщенной форме, через вектор плотности потока вещества. Эксперименты показывают, что конвективный перенос и диффузия – не единственные механизмы, отвечающие за перераспределение компонентов. Если неоднородности температуры становятся существенными, начинает проявляться так называемый термодиффузионный механизм переноса. Поток вещества, обусловленный термодиффузией, определяется в главном порядке точности градиентом температуры:

$$\mathbf{J} = -\rho D \frac{k_T}{T} \nabla T,$$

где  $\rho$  – плотность элемента жидкости. В качестве коэффициента пропорциональности выступает термодиффузионное отношение  $k_T$ , а отношение  $\alpha = k_T/T$  традиционно называется термодиффузионным коэффициентом. Термодиффузионный коэффициент может быть как положительным, так и отрицательным [2]. Если тяжелый компонент перемещается в холодную область, то термодиффузия считается нормальной (положительной), и наоборот, если тяжелая составляющая смеси перераспределяется в области с более высокой температурой, то термодиффузия называется аномальной (отрицательной). Теория термодиффузионных эффектов в тройных и более сложных многокомпонентных молекулярных жидких смесях во многом строится подобно бинарным средам [3, 4]. В то же время экспериментальная работа по установлению значений термодиффузионных коэффициентов в многокомпонентных жидкостях чрезвычайно трудоемка и обстоятельных работ, содержащих достоверные результаты, не так много [5]. В случае, когда роль второго компонента играют коллоидные частицы, на их перераспределение в среде может оказывать определенное влияние поле тяжести [6–8]. Явление оседания частиц в физической гидродинамике называется седиментацией. Плотность седиментационного потока для концентрации частиц имеет вид  $\mathbf{J} = \rho C U$  ( $U$  – скорость оседания). Для сферических частиц величина этой скорости вычисляется по известной формуле Эйнштейна:  $U = D\Delta\rho V_0 g/k(T)$ , где  $\Delta\rho$  – разность плотностей несущей жидкости и материала частиц,  $V_0$  – объем частицы,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $k$  – постоянная Больцмана.

Бывают ситуации, когда все перечисленные механизмы играют существенную роль при формировании наблюдаемых концентрационно-конвективных эффектов. В работах [9, 10] была экспериментально и теоретически рассмотрена задача о движении магнитной жидкости на основе керосина в связанных каналах при подогреве снизу. Показано, что феррожидкость ведет себя подобно молеку-

лярным бинарным смесям с положительной термодиффузией. В «чистом» керосине без феррочастиц и дизельном топливе наблюдаются специфические перебросовые колебания, характерные для молекулярных бинарных жидких смесей с положительной термодиффузией [11]. Период перебросов в магнитной жидкости [9, 10] значительно превышает таковой в молекулярных бинарных смесях, а форма колебаний имеет прямоугольную форму. Объяснение опытных данных оказалось возможным с помощью расширенных уравнений тепловой конвекции для многокомпонентных смесей с учетом в уравнениях различных механизмов переноса: для молекулярной смеси – термодиффузии, а для феррочастиц – седиментации [10].

Однако проблематика корректного учета механизмов переноса примесей в жидкостях этими примерами не ограничивается. Существует множество задач, в которых причины, определяющие перераспределение компонентов в массивах вещества, до сих пор не выяснены. В работах [12–14] экспериментально исследовались процессы перераспределения концентрации компонентов в жидких смесях расплавов металлов и предложены определенные модели их расслоения. В этих работах исследовалось расслоение бинарных металлических расплавов в тонких стеклянных капиллярах. В экспериментах в основном использовались расплавы олова и свинца (Sn-Pb) с разными концентрациями, однако, аналогичные явления наблюдались и в расплавах индий-висмут (In-Bi). Было показано, что при выдержке расплава в вертикальных капиллярах распределение концентрации тяжелого компонента по длине канала зависит от высоты, не зависит от диаметра капилляра, обратным образом связано с температурой и стремится к определенному пределу при увеличении длительности эксперимента. Чем больше высота капилляра и ниже температура процесса, тем больше достигается разность концентраций на концах отвердевшего образца. Но при фиксированной высоте капилляра достигаемая разность концентраций стремится к пределу при любом увеличении длительности эксперимента.

Анализ этих работ позволяет заключить, что расслоение смесей, зафиксированное в разных по постановке экспериментах, действительно имеет место. Однако предлагаемые для объяснения теоретические модели [13, 14] не выдерживают критики. В частности, в работах [13, 14] утверждается, что из совокупности экспериментальных данных вытекает вывод о том, что эффект расслоения может быть объяснен только при условии «качественно иного взгляда на структуру и свойства металлических расплавов, и жидкостей вообще». Для объяснения расслоения в канале вдоль вертикали выдвигается гипотеза о существовании «сверхтекучих тонких слоев примесей металлов» на границе раздела «жидкий металл – стеклянный капилляр». С точки зрения авторов работ [13, 14] при температуре расплава имеет место «приповерхностная *сверхтекуче-*

честь» одного из компонентов, которая играет ключевую роль в необъяснимо быстром перераспределении примеси вдоль капилляра.

Эффекты, наблюдавшиеся в экспериментах [12–14], недостаточно систематизированы, и по ним сложно сделать какое-либо определенное заключение о природе явлений. Однако это не дает повода привлекать для объяснения экспериментов ничем не обоснованные гипотезы, типа наличия «сверхтекучести» одного из компонентов при температуре расплава. В качестве примера разумного и научно обоснованного объяснения эффекта перераспределения примеси в жидкости-носителе рассмотрим явление остывания тонкого столба бинарной жидкости с учетом классического эффекта термодиффузии. Покажем, что термодиффузия может приводить к желаемому перераспределению примеси в длинном вертикальном канале, так что разность концентраций между верхним и нижним торцами может достигать экспериментально фиксируемых значений.

#### Эксперимент

В экспериментах в основном использовались водные растворы сульфата натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Соль перемешивалась с дистиллированной водой до получения однородной концентрации. Полученный раствор заливался в пластиковые трубки высотой от 62 до 156 мм и диаметром от 5 до 6 мм. Трубка закрывалась с торцов пробками и помещалась в сосуд с холодной водой с температурой от 0 до 20 °С. Через 5–30 мин выдержки трубка с раствором переносилась в водный термостат, нагретый до 50 °С, также на 5–30 мин. Проводилось от одного до пяти циклов «охлаждение-нагрев» либо при вертикальной ориентации трубки, либо при горизонтальном положении последней. По окончании опыта в верхней и нижней частях трубки с помощью шприца брались пробы жидкости для определения концентрации с помощью оптического рефрактометра ИРФ-454Б2М. В части опытов в центре трубки размещался один из спаев медь-константановой дифференциальной термопары с диаметром прово-

дов 0,1 мм, а другой спай укреплялся на стенке трубки. При помощи микровольтметра «Термодат 38В1» и компьютерной программы TermodatNet записывались температурные кривые прогрева и охлаждения образца (рис. 1), представляющие разность температур  $\Theta(t)$  между точками вблизи центра трубки и около стенки.

Рис. 1, а показывает, что релаксация температурного поля в образце достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью от времени. Тепловую конвекцию, возникающую в объеме в первый момент после помещения образца в холодную или горячую воду, можно характеризовать числом Рэлея  $\text{Ra} = g\beta_i\Theta R^3/\nu\chi \sim 4 \cdot 10^3$  ( $R$  – радиус трубки). При оценивании числа Рэлея использовались кинематическая вязкость  $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , температуропроводность  $\chi = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  и коэффициент теплового расширения воды  $\beta_i = 3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ , взятые при температуре 25 °С.

Из термограмм рис. 1 видно, что заметные радиальные разности температур в объеме сохраняются весьма короткое время: ~ 1 мин. В остальное время температура в жидкости практически однородна и перенос компонентов раствора возможен только за счет концентрационной конвекции, если достаточные неоднородности состава смеси были сгенерированы, например, в результате термодиффузии. Водные растворы сульфата натрия характеризуются сравнительно большим положительным коэффициентом  $\text{Sore}$  – порядка  $10^{-2} \text{ K}^{-1}$ , а радиальные температурные градиенты в тонком пристеночном слое в начале переходного процесса весьма велики – больше чем  $10^2 \text{ K/см}$ . Время жизни концентрационных неоднородностей в жидкостях значительно больше, чем температурных, так как коэффициент диффузии сульфата натрия в воде на два порядка меньше коэффициента температуропроводности.

В табл. 1 приведены результаты измерения разности концентраций образцов, взятых в верхней ( $C_B$ ) и нижней ( $C_H$ ) частях трубки длиной  $h = 120 \text{ мм}$  и диаметром  $d = 6 \text{ мм}$ , температура холодного термостата составляла 0 °С, а температура горячего термостата – 50 °С.

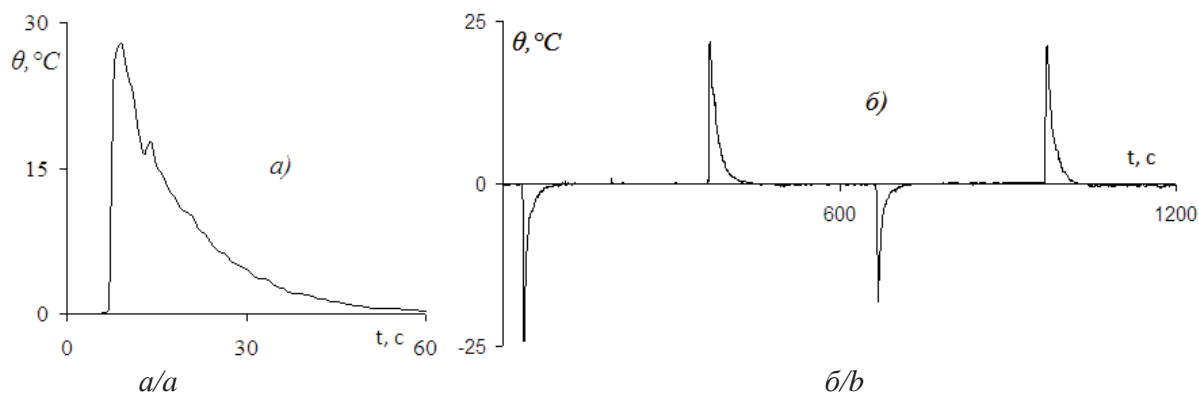


Рис. 1. Термограммы: а) кривая прогрева образца; б) термограмма опыта с двумя циклами «охлаждение-нагрев»

Fig. 1. Thermograms: a) the curve corresponds to the sample warming up; b) experimental thermogram with two circles of «heating-cooling»



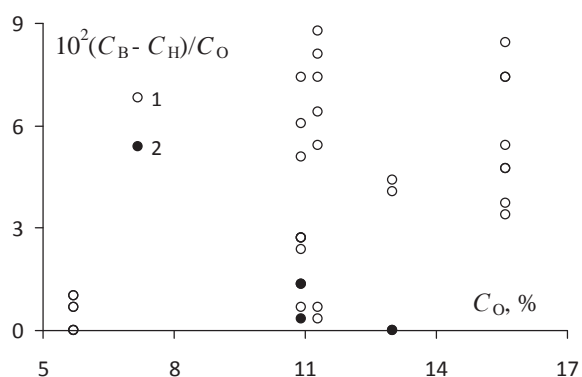
**Таблица 1.** Разделение концентрации в вертикальных трубках высотой 120 мм

**Table 1.** Division of components in vertical channels with the height 120 mm

Описание опыта Experiment description	Средняя $C_0$ Average $C_0$	$(C_B - C_U) / C_0$ $(C_U - C_L) / C_0$
5 циклов: нагрев 5 мин, охлаждение 5 мин (50 мин) 5 cycles: 5 min heating, 5 min (50 min) cooling	11,4	0,011
3 цикла: нагрев 10 мин, охлаждение 10 мин (60 мин) 3 cycles: 10 min heating, 10 min (60 min) cooling	14,6	0,061
3 цикла: нагрев 30 мин, охлаждение 30 мин (180 мин) 3 cycles: 30 min heating, 30 min (180 min) cooling	14,0	0,068
3 цикла: нагрев 30 мин, охлаждение 30 мин (180 мин) 3 cycles: 30 min heating, 30 min (180 min) cooling	14,0	0,062

Из табл. 1 видно что, несмотря на короткое время жизни температурных неоднородностей, в объеме генерируются измеримые концентрационные неоднородности.

При вертикальной ориентации трубки эти неоднородности разносятся за счет концентрационной конвекции по вертикали. Вверху собирается более легкая часть раствора, а внизу – тяжелая. Вероятный механизм разделения – это термодиффузия в радиальном направлении из-за радиальных температурных неоднородностей при остывании или нагреве цилиндрического объема. Для трубок радиусом  $R=3$  мм характерное время разделения можно оценить величиной  $\tau=R^2/\pi D \sim 1$  час. Время жизни возникших неоднородностей исчисляется уже сутками, т. к. теперь релаксация происходит за счет молекулярной диффузии по вертикали на размере  $h$ , который намного превышает  $R$ :  $(h/R)^2 \sim 1,6 \cdot 10^3$ .



**Рис. 2.** Неоднородности концентрации раствора при замораживании: 1 – при вертикальной ориентации образца; 2 – при горизонтальной ориентации образца

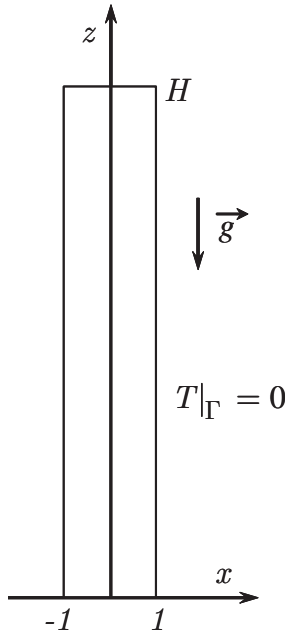
**Fig. 2.** Inhomogeneity of solution concentration as a result of freezing: 1 – vertical orientation of the sample; 2 – horizontal orientation of the sample

Во второй серии экспериментов трубки с однородным раствором комнатной температуры размещались вертикально или горизонтально в камере морозильника и выдерживались там до полного замораживания образца. Затем образец доставался из камеры и от него отделялись кусочки по 5 мм с каждого из торцов. Кусочки плавилась на измерительном стекле рефрактометра – так определялась концентрация раствора. На рис. 2 приведены результаты этих опытов. Обращает на себя внимание значительный разброс значений полученных неоднородностей. Причина большого разброса пока осталась не выясненной, но уверенно можно сказать, что определяющей для величины неоднородности является ориентация образца. При вертикальной ориентации трубок в большинстве опытов генерировались неоднородности величиной до 9 % от средних значений. При замораживании раствора в горизонтальном положении трубки неоднородности не превышали 2 %.

### Теоретическое описание

Рассмотрим однородный по температуре тонкий вертикальный столб бинарной жидкости с твердыми границами (рис. 3), для простоты имея в виду двумерную постановку задачи. В ходе численного моделирования границы полости будем считать твердыми и непроницаемыми для вещества, т. к. в описанных выше экспериментах бинарная водно-солевая смесь заключалась в полипропиленовую трубку. Будучи в начальный момент времени однородной по температуре, смесь находится в состоянии механического равновесия. В ходе остывания сердцевина столба жидкости имеет более высокую температуру, нежели окружающая среда, поэтому за счет неустойчивой стратификации в смеси сразу начинается крупномасштабное конвективное течение, приводящее к перераспределению примеси во всем объеме. Удивительно, но за короткое (порядка нескольких минут) время остывания жидкости термодиффузия успевает внести определенный вклад в процесс переноса примеси. Покажем, что поперечные градиенты температуры, генерируемые при остывании столба жидкости, достаточно велики, так что за это время примесь успевает перераспределиться к стенкам капилляра. Растворы солей  $\text{NaCl}$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в воде характеризуются положительной термодиффузией. Это означает, что тяжелый компонент стремится переместиться в области с более низкой температурой, т. к. поток примеси направлен противоположно градиенту температуры. После перемещения к боковым границам примесь подхватывается конвективным потоком и уносится к нижнему торцу. Иными словами, в условиях самостоятельного остывания вертикального столба жидкости в холодильнике примесь должна накапливаться вблизи нижнего торца, в то время как у верхнего торца должно иметь место обеднение жидкости-носителя тяжелым компонентом. Опи-

сание этого процесса заметно осложняется взаимным действием диффузии и тепловой конвекции.



**Рис. 3.** Капилляр прямоугольной формы в поле тяжести, заполненный жидкой бинарной смесью

**Fig. 3.** Channel of the squared shape filled with the binary liquid in a gravity field

Для теоретического описания конвективных течений бинарной смеси будем использовать систему уравнений для несжимаемой жидкости, которая впервые была получена в работе [15], исходя из уравнений гидродинамики в приближении Буссинеска. Вывод, обсуждение области применимости этих уравнений и примеры задач можно найти в работах [16, 17]:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{V} + g(\beta_t T - \beta_c C) \gamma, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) T = \chi \Delta T, \quad \text{div} \mathbf{V} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) C = D(\Delta C + \alpha \Delta T). \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{V}$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $C$  – как и ранее, поля скорости, давления, температуры и концентрации тяжелой примеси. Параметры  $\chi$ ,  $\nu$  и  $\alpha$  – коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и термодиффузии ( $\alpha > 0$  отвечает нормальной термодиффузии,  $\alpha < 0$  – аномальной). В уравнениях  $\beta_c$  и  $\beta_t$  – соответственно, коэффициенты зависимости плотности жидкости от концентрации и теплового расширения. В нашем случае  $\beta_c > 0$ , т. к. сульфат или хлорид натрия, рассмотренные в роли добавки, представляют собой тяжелый компонент.

За единицы измерения динамических и термодинамических характеристик выберем: расстояние – полутолщина канала  $[d]$ ; температура – разность начальной температуры образца и холодильника  $[\Theta]$ ; время –  $[d^2/\nu]$ ; скорость –  $[\nu/d]$ ; концентрация –  $[\beta_t \Theta / \beta_c]$ ; давление –  $[\rho \nu^2 / d^2]$ .

Для удобства решения эволюционной краевой задачи введем новую переменную  $F = C + \alpha T$ , т. к. именно на производные от этой функции выставляются условия на границах полости. После процедуры обезразмеривания конвективные уравнения (1)–(3) в терминах функции тока  $\psi$ , вихря скорости  $\varphi$  и новой переменной  $F$  приобретают следующий вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \Delta \varphi - \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}} \left( \frac{\partial T}{\partial x} (1 + \varepsilon) - \frac{\partial F}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) T = \frac{1}{\text{Pr}} \Delta T, \quad \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) F = \frac{1}{\text{Sc}} \Delta F + \frac{\varepsilon}{\text{Pr}} \Delta T. \quad (5)$$

Компоненты скорости связаны с функцией тока следующими соотношениями:  $V_x = \partial \psi / \partial z$ ,  $V_z = -\partial \psi / \partial x$ . В уравнениях  $\varphi = \Delta_{xy} \psi$  с точностью до знака – вихрь скорости.

#### Безразмерные параметры задачи

Система уравнений характеризуется набором стандартных безразмерных параметров:

$$\text{Pr} = \nu / \chi, \quad \text{Sc} = \nu / D,$$

$$\text{Ra} = g \beta_t \Theta d^3 / \nu \chi, \quad \varepsilon = \alpha \beta_c / \beta_t,$$

где  $\text{Pr}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Ra}$  и  $\varepsilon$  – числа Прандтля, Шмидта, Рэлея и параметр разделения смеси. Параметры задачи выберем, опираясь на значения, реализованные в описанном выше эксперименте с раствором сульфата натрия. Возьмем типичную начальную разность температур между столбом жидкости и холодильником  $\Theta = 20^\circ \text{C}$  в качестве характерной температуры для оценки числа Рэлея. Чтобы не усложнять задачу, величины кинематической вязкости и теплопроводности брались как для воды – число Прандтля  $\text{Pr} = 7$ . Для упрощения процедуры численного моделирования предполагалось, что вязкость не зависит от температуры. Геометрические параметры столба жидкости:  $2d = 5$  мм,  $h = 5$  см (условие  $h \gg d$  выполняется хорошо, как и в эксперименте). Характерное значение числа Рэлея в ходе численного моделирования полагалось равными  $\sim 10^3$ . Использованное значение было ниже экспериментального, но численные расчеты, ввиду выбранной плоской геометрии, предполагают только качественное сравнение с опытами.

Водные растворы солей характеризуются относительно слабой диффузией. Для раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в воде коэффициент диффузии  $D = 7,6 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с [18].

В силу малости диффузионного коэффициента числа Шмидта у подобных смесей велики и составляют примерно  $Sc=10^3$ . С другой стороны, известно, что водные растворы хлорида и сульфата натрия описываются положительной термодиффузией и весьма большими значениями термодиффузионного параметра, соответственно имеем  $\varepsilon=0,3, 1,4$  [19].

**Граничные и начальные условия. Методика расчета**

В опытах жидкость была заключена в твердую, но эластичную оболочку, поэтому на скорость, как на торцах, так и на боковых границах, ставилось условие прилипания в каждый момент времени  $V|_r=0$ .

Начальная температура образца полагалась одинаковой во всем массиве, за исключением боковых границ и торцов. Температура массива в начальный момент времени была равна  $\Theta$ . Температура граней задавалась равной нулю, как в холодильнике. Нормальная компонента потока вещества должна быть равна нулю на границах расчетной области  $J_n=0$ , поэтому на вспомогательную функцию  $F$  в каждый момент времени накладывалось граничное условие:  $\partial F/\partial n|_r=0$ . Поле концентрации примеси восстанавливалось в ходе расчета по формуле  $C=F-\varepsilon T$ .

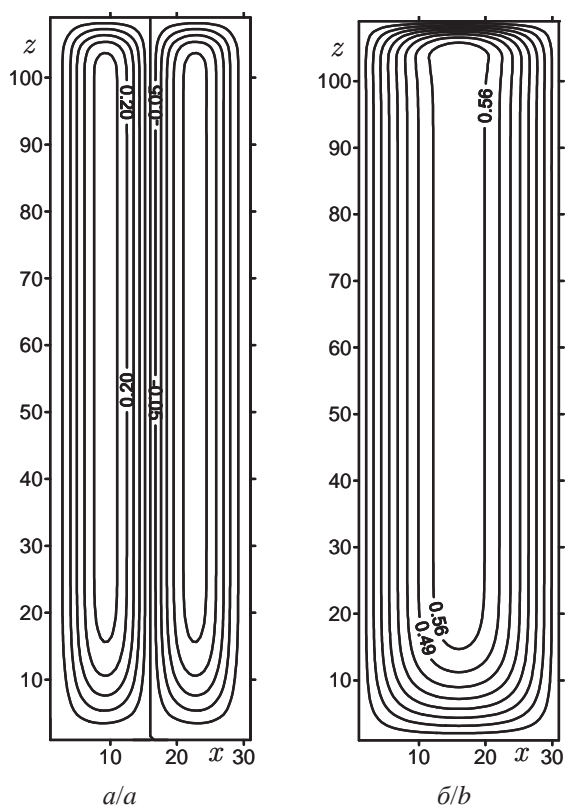


Рис. 4. Поля: а)  $y(x,z)$ ; б)  $T(x,z)$  в момент времени  $t=2$

Fig. 4. The stream function and temperature fields: а)  $y(x,z)$ ; б)  $T(x,z)$  at the point of time  $t=2$

Для решения поставленной задачи использовался метод конечных разностей. Алгоритм был

разработан в соответствии с явной схемой решения уравнений в частных производных и основан на двухполевой методике [20]. При аппроксимации производных по времени и производных по координатам использовались, соответственно, односторонние и центральные разности. Шаг по времени выбирался из соображения устойчивости численной процедуры. При решении уравнения Пуассона для функции тока в каждый момент времени применялся метод простых итераций. На границах полости для вычисления вихря скорости использовались формулы Тома. Рабочее количество узлов в сечении канала –  $31 \times 109$ . Данное разбиение расчетной области позволяло разрешать на начальном этапе концентрационные пограничные слои вблизи границ. В ходе расчетов использовался метод установления. Компьютерный код был реализован на языке программирования FORTRAN-90. При проведении расчетов осуществлялась периодическая запись искомых полей на диск, что позволяло анализировать эволюцию полей в каждый момент времени.

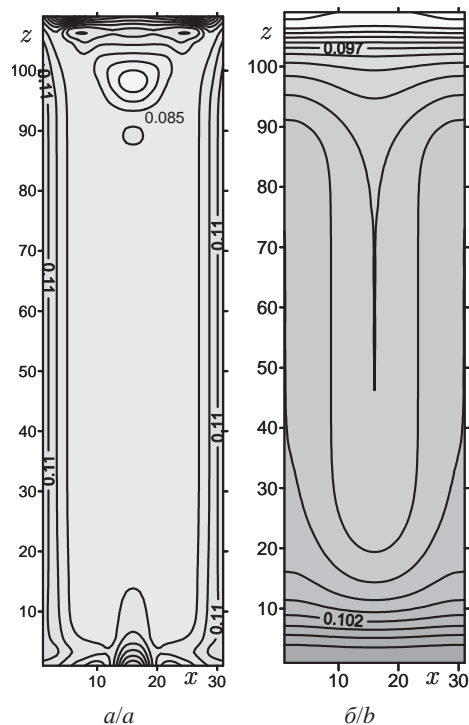
**Результаты численного моделирования**

Расчеты для вертикального канала показывают, что за короткое время, порядка 10 мин, при остывании жидкости от комнатной температуры до  $0^\circ\text{C}$  термодиффузия успевает до момента рассасывания градиентов температуры осуществить кондуктивное перераспределение примеси от середины полости к ее боковым границам. Поля функции тока и температуры в некоторый промежуточный момент времени на стадии интенсивного остывания приведены на рис. 4.

Видно, что практически сразу после внесения капилляра в холодильник в жидкости возникает довольно интенсивное течение с подъемом в центре и нисходящим движением вдоль боковых границ. Вследствие крупномасштабного конвективного двухвихревого движения происходит дополнительный конвективный перенос примеси между верхним и нижним торцами канала. Результаты численного моделирования, представленные на рис. 4, получены для следующего набора параметров: число Рэлея  $Ra=560$ , термодиффузионный параметр  $\varepsilon=0,3$  (что приблизительно соответствует раствору NaCl в воде), числа Прандтля и Шмидта, соответственно,  $Pr=6,7$  и  $Sc=1000$ , длина полости  $H=20$ , толщина полости  $d=2$ .

Поля функции тока и температуры качественно не меняют своего вида с течением времени. Структура этих полей всегда отвечает двухвихревому движению. В этом смысле изменяется только интенсивность движения. В тоже время поле концентрации примеси сильно трансформируется, эволюционируя к определенному состоянию с продольной стратификацией. На рис. 5 приведены распределения концентрации тяжелого компонента в вертикальном сечении для приведенного выше набора параметров и двух разных моментов времени. Видно, что на начальном этапе примесь образу-

ет ярко выраженный пограничный слой вдоль вертикальных границ и слегка заметную обедненную примесью слоистую структуру у верхнего торца, которая затем размывается конвективным течением и становится более однородной.



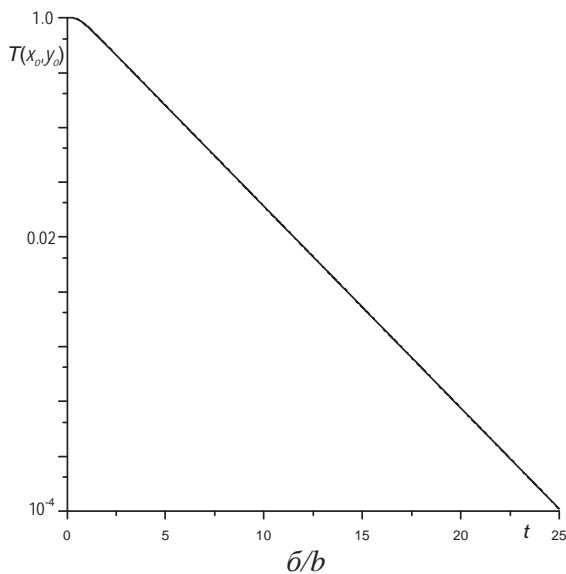
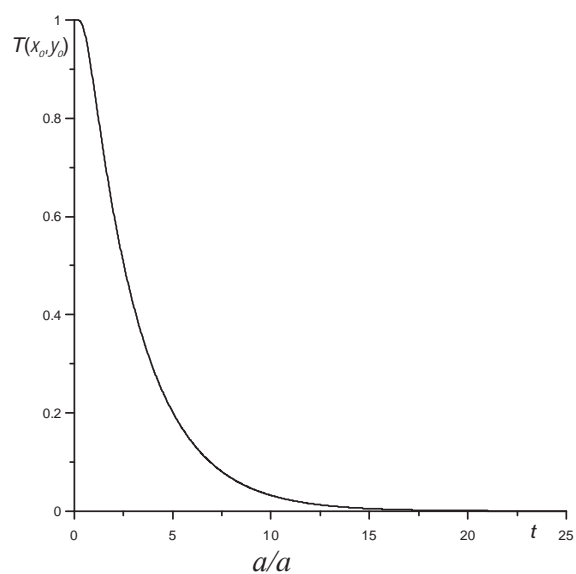
**Рис. 5.** Распределение концентрации примеси в вертикальном сечении в моменты времени: а)  $t=8$ ; б)  $t=75$

**Fig. 5.** The distribution of admixture concentration in a vertical cross section at two points of time: а)  $t=8$ ; б)  $t=75$

Рис. 5, а отвечает моменту времени с наиболее развитым течением. В конце процесса остывания разница в концентрации тяжёлой примеси между верхом и низом полости составляет порядка 10 % (рис. 5, б). График зависимости температуры в центре столба жидкости от времени, описывающий процесс остывания, приведён на рис. 6. Использование логарифмической шкалы для этой зависимости показывает, что температура изменяется с течением времени, как и ожидалось, по экспоненциальному закону.

#### Горизонтальный канал

В противоположность явлениям, наблюдавшимся в вертикальном канале, при самопроизвольном остывании горизонтального столба жидкости похожих аккумулятивных эффектов на торцах не возникает. Изучим теперь конвективные течения и массоперенос в горизонтальной полости с тем же соотношением сторон (рис. 7). Действие термодиффузии и конвекции теперь не синхронизировано, как ранее, в том смысле, что длинные горизонтальные грани и малая высота не дают развиваться крупномасштабной конвекции, которая могла бы организованно переносить примесь на большие расстояния в пределах полости, как, например, в наклонном слое [11]. Распределение концентрации тяжёлой примеси в вертикальном сечении горизонтального канала приведено на рис. 7, на котором видна разница между максимумом и минимумом, которая интегрально составляет на торцах в среднем не более 0,1 %. Результаты численного моделирования получены для того же набора параметров,  $Ra$ ,  $Pr$ ,  $Sc$ ,  $e?$ , и соотношения сторон  $H=2$ ,  $d=20$ .



**Рис. 6.** График зависимости температуры в центре столба жидкости от времени: а) убывание температуры в реальном времени; б) в логарифмических единицах

**Fig. 6.** The dependence of temperature in the center of a channel on time: а) the temperature decreasing vs. real time; б) dependence on a logarithmic scale

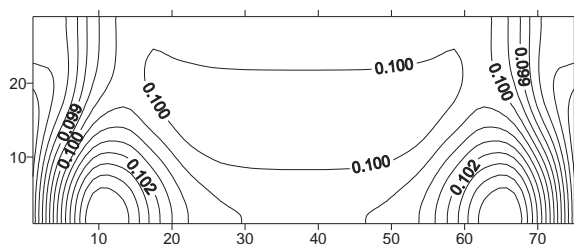


Рис. 7. Распределение концентрации в вертикальном сечении в момент времени  $t=75$

Fig. 7. The distribution of admixture concentration in a vertical cross section at the point of time  $t=75$

Для сравнения интенсивности конвекции в вертикальной и горизонтальной полостях приведём зависимость максимума функции тока в массиве от времени (рис. 8). Более высокое значение локальной мгновенной скорости имеет место в горизонтальном столбе жидкости, однако ввиду специфики геометрии конвекция в совокупности с термодиффузией не приводят к масштабному перераспределению примеси в полости.

#### Заключение

В работе проведено экспериментальное и численное моделирование процесса остывания жидкого стержня бинарной молекулярной смеси с учетом положительной термодиффузии в растворе. Проанализирован процесс результирующего действия конвективного, диффузионного и термодиффузионного перераспределения примеси в вертикальном и горизонтальном тонких каналах. Вычислены распределения полей скорости, температуры и концентрации примеси в каждый момент времени. Показано, что, несмотря на небольшие характерные времена остывания, термодиффузия может оказывать существенное влияние на про-

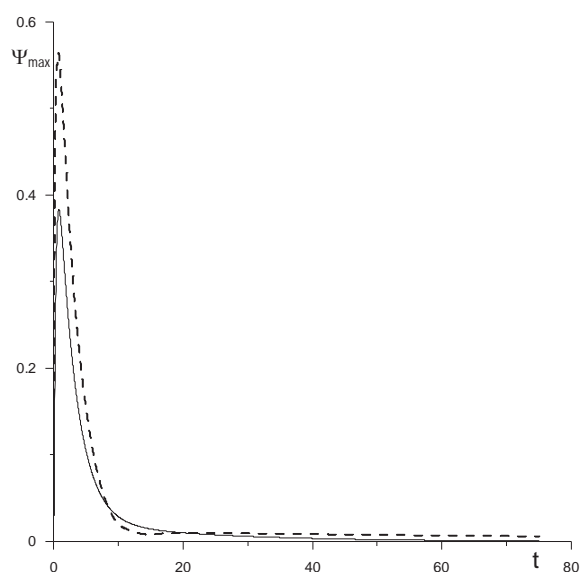


Рис. 8. Зависимость максимума функции тока в массиве от времени: штриховая линия – горизонтальный слой жидкости; сплошная линия – вертикальный столб жидкости

Fig. 8. Dependence of the stream function maximum on time: dashed line – horizontal fluid layer; solid line – vertical liquid column

цессы массопереноса, сопоставимое с конвективным и диффузионным механизмами. Из расчетов следует, что осязательное разделение смеси между торцами наблюдается в случае вертикального расположения столба жидкости при его остывании, что подтверждается экспериментально. В случае горизонтального расположения канала подобного перераспределения не наблюдалось.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
2. Рыжков И.И. Термодиффузия в смесях: уравнения, симметрии, решения и их устойчивость. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 200 с.
3. Larre J.P., Platten J.K., Chavepeyer G. Soret effects in ternary systems heated from below // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1997. – V. 40. – № 3. – P. 545–555.
4. Ryzhkov I.I., Shevtsova V.M. On thermal diffusion and convection in multicomponent mixtures with application to the thermogravitational column // Physics of Fluids. – 2007. – № 19. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/19/2/10.1063/1.2435619> (дата обращения: 15.05.2015).
5. Sechenyh V., Legros J.C., Shevtsova V. Measurements of optical properties in binary and ternary mixtures containing cyclohexane, toluene and methanol // J. of Chemical and Engineering Data. – 2012. – V. 57. – P. 1036–1043.
6. Donzelli G., Cerbino R., Vailati A. Bistable heat transfer in a nanofluid // Phys. Rev. Letters. – 2009. – V. 102. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.102.104503> (дата обращения: 15.05.2015).
7. Shliomis M.I., Smorodin B.L. Onset of convection in colloids stratified by the gravity // Phys. Rev. E. – 2005. – V. 71. URL: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.71.036312> (дата обращения: 15.05.2015).
8. Traveling-wave convection in colloids stratified by gravity / B.L. Smorodin, I.N. Cherepanov, B.I. Myznikova, M.I. Shliomis // Phys. Rev. E. – 2011. – V. 84. URL: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.84.026305> (дата обращения: 15.05.2015).
9. Глухов А.Ф., Путин Г.Ф. Конвекция магнитных жидкостей в связанных каналах при подогреве снизу // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2010. – № 5. – С. 41–48.
10. Глухов А.Ф., Демин В.А., Попов Е.А. Тепловая конвекция магнитной наносuspension в узких каналах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2013. – № 1. – С. 41–51.
11. Глухов А.Ф., Демин В.А., Путин Г.Ф. Конвекция бинарной смеси в связанных каналах при подогреве снизу // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2007. – № 2. – С. 13–23.
12. Гаврилин И.В. Седиментационный эксперимент при изучении жидких сплавов // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 2. – С. 66–73.
13. Uglev N.P., Gavrilin I.V. Mathematical model of a stratification of metal melts in capillaries // Journal of Physics: Conf. Series. – 2008. – V. 98. URL: <http://iopscience.iop.org/artic>

- le/10.1088/1742-6596/98/2/022013 (дата обращения: 15.05.2015).
14. Углев Н.П., Гаврилин И.В. Механизм равновесного функционального расслоения бинарных металлических расплавов в капиллярах // Труды XIII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». – Екатеринбург, 2011. – Т. 1. – С. 118.
  15. Шапошников И.Г. К теории конвективных явлений в бинарной смеси // Прикладная математика и механика. – Т. 17. – Вып. 5. – 1953. – С. 604–606.
  16. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
  17. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
  18. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. В 7 т. Т. 3. – М.: Химия, 1965. – 1008 с.
  19. Демин В.А. Конвективные сепараторы // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 60–67.
  20. Тарунин Е.Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1990. – 225 с.

Поступила 04.09.2015 г.

UDC 532.529.2

## ON THERMODIFFUSION INFLUENCE ON THE DOPANT DISTRIBUTION DURING THE FREEZING OF BINARY LIQUID COLUMN

**Alexander F. Glukhov,**

Perm State University, 15, Bukirev Street, Perm, 614990, Russia.  
E-mail: glu@psu.ru

**Vitaliy A. Demin,**

Perm State University, 15, Bukirev Street, Perm, 614990, Russia.  
E-mail: demin@psu.ru

**Alexander V. Tretyakov,**

Perm State University, 15, Bukirev Street, Perm, 614990, Russia.  
E-mail: tretyakovgroup@yandex.ru

*The relevance of the study* is caused by the necessity of the extension of fundamental experimental and theoretical research in the field of macroscopic hydrodynamic phenomena in multicomponent liquid molecular mixtures. The results can be used in chemical technologies; they can change our point of view on the processes of deep waste water reclamation and safe utilization of geological resources.

*The main aim* is to investigate the phenomenon of liquid molecular mixtures separation in thin channels by means of thermodiffusion over the self-cooling procedure; to compare different mechanisms of transfer – convection of short duration, diffusion and thermodiffusion – on the process of the components redistribution in the thin columns filled with a water-salt solution. The undertaken investigation has been executed to explain the origination of appreciable vertical stratification of different components of the mixture that gives significant variability of water salinity along the channel height.

*The methods used in the study:* to fulfill the plan of our research the experimental and theoretical methods had been used that simulated physical processes under consideration: experimental data on concentration measurement which were taken during the freezing of the samples had been compared with the results of direct numerical modeling received by the finite difference method. The measurement of temperature fields was realized with the help of thermocouple technique. Numerical procedure was based on the full equations system of thermohaline convection.

*The results.* The authors have shown that thermal convection, diffusion and strong positive thermodiffusion typical for the water-salt solutions can lead to the evident longitudinal division on components in the thin vertical channels filled with liquid mixtures over the self-cooling process and following freezing. The explanation of the strong longitudinal division in the liquid mixtures is based on the joint effect of two different physical mechanisms. There are thermodiffusion displacement of the admixture to the boundary layers of the channel and the large-scale axial convective flow. The similar phenomena could take place in artificial hydrological systems, natural geological processes and technological applications.

### **Key words:**

Liquid binary mixtures, normal thermodiffusion, convective transfer, division into components.

## REFERENCES

- Landau L.D., Lifshitz E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. 6. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol. 6. Fluid dynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 736 p.
- Ryzhkov I.I. *Termodiffuziya v smesyakh: uravneniya, simmetrii, resheniya i ikh ustoychivost* [Thermodiffusion in mixtures: equations, symmetry, solutions and its stability]. Novosibirsk, SO RAN Press, 2013. 200 p.
- Larre J.P., Platten J.K., Chavepeyer G. Soret effects in ternary systems heated from below. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1997, vol. 40, no. 3, pp. 545–555.
- Ryzhkov I.I., Shevtsova V.M. On thermal diffusion and convection in multicomponent mixtures with application to the thermogravitational column. *Physics of Fluids*, 2007, no. 19. Available at: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/19/2/10.1063/1.2435619> (accessed 15 May 2015).
- Sechenyh V., Legros J.C., Shevtsova V.M. Measurements of optical properties in binary and ternary mixtures containing cyclohexane, toluene and methanol. *J. of Chemical and Engineering Data*, 2012, vol. 57, pp. 1036–1043.
- Donzelli G., Cerbino R., Vailati A. Bistable heat transfer in a nanofluid. *Phys. Rev. Letters*, 2009, vol. 102. Available at: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.102.104503> (accessed 15 May 2015).
- Shliomis M.I., Smorodin B.L. Onset of convection in colloids stratified by the gravity. *Phys. Rev. E.*, 2008, vol. 71. Available at: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.71.036312> (accessed 15 May 2015).
- Smorodin B.L., Cherepanov I.N., Myznikova B.I., Shliomis M.I. Traveling-wave convection in colloids stratified by gravity. *Phys. Rev. E.*, 2011, vol. 84. Available at: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.84.026305> (accessed 15 May 2015).
- Glukhov A.F., Putin G.F. Konveksiya magnitnykh zhidkostey v svyazannykh kanalakh pri podogreve snizu [Convection of magnetic liquids in connected channels under the heating from below]. *Izv. RAN. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2010, no. 5, pp. 41–48.
- Glukhov A.F., Demin V.A., Popov E.A. Teplovaya konveksiya magnitnoy nanosuspensii v uzkiykh kanalakh [Thermal convection of magnetic nanosuspension in narrow channels]. *Izv. RAN. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2013, no. 1, pp. 41–51.
- Glukhov A.F., Demin V.A., Putin G.F. Konveksiya binarnoy smesi v svyazannykh kanalakh pri podogreve snizu [Convection of binary mixture in connected channels under the heating from below]. *Izv. RAN. Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 2007, no. 2, pp. 13–23.
- Gavrilin I.V. Sedimentatsionnyy eksperiment pri izuchenii zhidkikh splavov [Sedimentation experiment over the investigation of liquid melts]. *Izv. AN SSSR. Metall*, 1985, no. 2, pp. 66–73.
- Uglev N.P., Gavrilin I.V. Mathematical model of a stratification of metal melts in capillaries. *Journal of Physics: Conf. Series*, 98, 2008, vol. 98. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/98/2/022013> (accessed 15 May 2015).
- Uglev N.P., Gavrilin I.V. Mekhanizm ravnovesnogo funktsionalnogo rassloeniya binarnykh metallicheskiykh rasplavov v kapillyarakh [Mechanism of functional equilibrium division of binary metal melts in capillary]. *Trudy XIII Rossiyskoy konferentsii «Stroeniye i svoystva metallicheskiykh i shlakovykh rasplavov»* [Proc. 13th Rus. Conf. The structure and properties of metal and slag melts]. Vol. 1. Ekaterinburg, 2011. pp. 118.
- Shaposhnikov I.G. K teorii konvektivnykh yavleniy v binarnoy smesi [About the theory of convective phenomena in binary mixtures]. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika*, 1953, vol. 17, iss. 5, pp. 604–606.
- Gershuni G.Z., Zhukhovitskiy E.M. *Konvektivnaya ustoychivost neszchimaemoy zhidkosti* [Convective stability of incompressible fluids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 392 p.
- Gershuni G.Z., Zhukhovitskiy E.M., Nepomnyashchiy A.A. *Ustoychivost konvektivnykh techeniy* [Stability of convective flows]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 320 p.
- Spravochnik Khimika* [Hand-book of a Chemist]. Ed. by B.P. Nikolskiy. Vol. 3. Moscow, Khimiya Publ., 1965. 1008 p.
- Demin V.A. Konvektivnye separatory [Convective separators]. *Prikladnaya Fizika*, 2013, no. 4, pp. 60–67.
- Tarunin E.L. *Vychislitelnyy eksperiment v zadachakh svobodnoy konveksii* [Numerical experiment in the problems of free convection]. Irkutsk, Irkutsk university Publ. house, 1990. 225 p.

Received: 4 September 2015.

УДК 581.132.8:582.091:551.515

## ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ОТНОШЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА В ПЫЛЬЦЕ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ СЕЗОНА ВЕГЕТАЦИИ

**Бляхарчук Татьяна Артемьевна,**

докт. биол. наук, ведущий научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 643055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; ведущий научный сотрудник лаборатории «БиоКлимЛанд» Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
E-mail: tarun5@rambler.ru.

**Симонова Галина Владимировна,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 643055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; доцент кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: galina\_simonova@inbox.ru

**Ветрова Ольга Викторовна,**

научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 643055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.  
E-mail: vetrovao.v@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска более точных маркеров индикации палеоклимата Сибири для верификации стратиграфии отложений при разведке георесурсов.

**Цель работы.** Выявить перспективы использования изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  пыльцы лиственных древесных видов флоры Сибири для палеоклиматических исследований.

**Методы исследования.** С этой целью был исследован изотопный состав пыльцы восьми видов сибирской флоры, собранной в разные годы, и результаты сопоставлены с погодными условиями апреля и мая года сбора пыльцы. Для исследования сухая очищенная пыльца выбранных видов растений сжигалась в окислительно-восстановительном реакторе элементного анализатора Flash 2000. Выделившийся при горении  $\text{CO}_2$  анализировался в изотопном масс-спектрометре DELTA V Advantage (Том ЦКП СО РАН). Методанные для апреля и мая года сбора пыльцы были взяты с интернет-сайта.

**Результаты.** Анализ изотопного состава пыльцы лиственных деревьев сибирской флоры показал перспективность использования этого метода для индикации доминирующих погодных условий периода формирования пыльцы, то есть для палеоклиматических исследований. Исследование показало прямую зависимость обилия стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце лиственных деревьев от температуры (чем выше температура, тем больше ассимилируется изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце) и обратную зависимость от обилия осадков (чем больше осадков, тем меньше ассимилируется изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце). Ослабленные растения и растения, произрастающие при меньшей солнечной освещенности, ассимилировали заметно меньшее количество изотопа  $^{13}\text{C}$  по сравнению со здоровыми растениями, произрастающими в более благоприятных условиях.

### **Ключевые слова:**

Пыльца, древесные виды, стабильный изотоп углерода  $^{13}\text{C}$ , фракционирование стабильных изотопов, температура, осадки, палеоклимат.

### **Введение и литературный обзор**

В последние годы анализ изотопного состава углерода в растительных тканях и органах находит разнообразное практическое и фундаментальное применение в биологии, экологии и геологии. Сфера использования этого метода в биологии и экологии простирается от изучения физиологических процессов в организмах до изучения современных экологических условий [1], а также палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций [2]. Исследования показали, что различные организмы по-разному накапливают в своём теле стабильный изотоп углерода  $^{13}\text{C}$ . Так, цветко-

вые растения, имеющие  $\text{C}_4$ -механизм фотосинтеза (виды семейства *Chenopodiaceae* и некоторые культурные злаки американского происхождения) характеризуются значениями  $\delta^{13}\text{C}$  (в ‰ PDB) в пределах от  $-6$  до  $-23,5$ , а растения, имеющие  $\text{C}_3$ -механизм фотосинтеза (большинство современных сосудистых растений) имеют значения  $\delta^{13}\text{C}$  значительно ниже – от  $-23$  до  $-34$ . Это объясняется более эффективным усваиванием углекислоты растениями  $\text{C}_4$ -типа за счет сокращения потерь промежуточных продуктов фотосинтеза при фотодыхании [3]. У эукариотных водорослей диапазон варьирования значений  $\delta^{13}\text{C}$  значительно шире, от



–8 до –24,5 ‰, и наиболее широкий разброс значений содержания изотопа  $^{13}\text{C}$  отмечен в метаногенных бактериях, где величина  $\delta^{13}\text{C}$  изменяется от +6 до –41 ‰ [4].

Отношения стабильных изотопов углерода  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  использовались при исследовании физиологических процессов в растениях, произрастающих в различных экологических условиях, для выявления водного стресса [5]. Сосудистые растения реагируют на вариации в доступности воды и влажности воздуха путём открытия и закрытия листовых устьиц. Это ведёт к изменению в соотношении стабильных изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) атмосферного  $\text{CO}_2$ , используемого растением в фотосинтезе [6, 7]. В экспериментальных исследованиях на микроорганизмах установлено, что в условиях некоторого дефицита по субстрату температурные колебания начинают влиять на величину изотопных характеристик микробной биомассы [8].

Эколого-географические исследования показали, что растения с механизмами фотосинтеза С4 и С3 по-разному представлены в различных флорах. Так, растения С4 более обильны в аридных регионах, а растения С3 – в более гумидных регионах [9]. На основании этой закономерности был разработан метод анализа устойчивых изотопов углерода ископаемого растительного материала для выявления климатических сдвигов растительных зон по флорам с различной представленностью видов С3 и С4 в прошлые эпохи земной истории [10], что необходимо при стратиграфических исследованиях в геологии.

Важным направлением является использование стабильных изотопов для решения проблем палеоклиматологии [11]. При этом возникает необходимость решать следующие вопросы: В какой степени различные виды живых организмов фракционируют устойчивые изотопы? Как влияют вариации условий окружающей среды на фракционирование устойчивых изотопов в живых организмах? Влияют ли вариации погодных условий на фракционирование устойчивых изотопов углерода растениями? Какие компоненты «природных архивов» палеоинформации в торфах и озёрных отложениях наиболее пригодны для получения изотопного сигнала об изменении окружающей среды? Исследования по этим вопросам в мире только недавно начались. Полученные результаты немногочисленны, а выводы порой противоречивы. Так, исследования содержания  $^{13}\text{C}$  в *Sphagnum* биомаркере показали, что при насыщении сфагнома водой фотосинтезирующие клетки снижают потребление  $\text{CO}_2$  и становятся менее чувствительными к поглощению  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$  увеличивается), и наоборот [12]. В другой же работе, напротив, показано, что количество осадков негативно коррелирует с содержанием  $^{13}\text{C}$  в растениях. Чем больше осадков, тем меньше значения  $\delta^{13}\text{C}$  в растительных тканях [13, 14]. Возможно, что данное противоречие объясняется морфолого-физиологическими особенностями именно сфагновых мхов, отличающи-

ми их от других групп растений. Но в любом случае оно указывает на необходимость дифференцированного подхода при изучении изотопного сигнала в растительных остатках. Примером такого рода исследований является работа американского исследователя Хоуп Ярена [15], изучавшего соотношение стабильных изотопов в стеблях и пыльце 175 видов растений. Его исследования показали, что в зелёных стеблях растений содержится меньше изотопа  $^{13}\text{C}$ , чем в пыльце того же вида, а в древесных стеблях – изотопа  $^{13}\text{C}$  больше, чем в пыльце. Логически такая картина может быть объяснена тем, что в древесных стеблях (в отличие от пыльцы того же вида) аккумулируется углерод, ассимилированный за несколько лет, а в зелёных стеблях – только одного года вегетации, так как зелёные травянистые растения вегетируют в основном в течение одного сезона.

Современные способы выделения целлюлозы из торфов и её очищения позволили разработать метод изотопного анализа углерода и кислорода торфяных отложений для реконструкции динамики Азиатского муссона [16–18].

В ряде работ пыльца растений рассматривается как идеальная растительная ткань для палеоклиматических изотопных исследований [15], поскольку она сохраняется в осадках многие тысячи и миллионы лет и может быть отделена от другого ископаемого растительного материала. Кроме того, спорово-пыльцевые спектры, в отличие от растительных остатков и гуминовых составляющих, сохраняются в осадках стратиграфически, т. е. не перемешиваясь, и, следовательно, наиболее точно отражают условия окружающей среды во время их образования. Однако до настоящего времени изучению изотопного состава пыльцы посвящено лишь немного работ. Так, Амундсен с соавторами [19] изучил изотопный состав пыльцы 11 видов растений из семейства Роасеае. Десколлас-Грос с соавторами [20] опубликовал значения  $\delta^{13}\text{C}$  для пыльцы 33-х видов деревьев, трав и кустарников. Пионерные исследования зависимости изотопного состава пыльцы сосны от климата проведены Лоадером и Хеммингом [21].

Мы провели дополнительный анализ изотопных данных, опубликованных Хоуп Яреном [15], и нашли упущенную автором закономерность. Оказалось, что среди 175 видов растений, культивируемых в 11-ти ботанических садах США, парные экземпляры одного вида, выращиваемые в 2-х различных ботанических садах, имели разное содержание изотопа  $^{13}\text{C}$ . При этом не выявилось какой-либо зависимости изотопного состава углерода в пыльце от географической широты, но в 7 из 8 имевшихся пар в пыльце древесного вида, культивируемого в более континентальных условиях, содержание изотопа  $^{13}\text{C}$  было выше, чем в растениях того же вида, культивируемого в условиях мягкого морского климата. Таким образом, вероятно, в этих примерах проявилась отмеченная ранее закономерность уменьшения содержания

изотопа  $^{13}\text{C}$  в растительных тканях при увеличении количества осадков и наоборот [13, 14]. В качестве прямого наблюдения зависимости изотопного состава пыльцы от климатических параметров в предлагаемом исследовании мы впервые провели измерение изотопного обогащения  $\delta^{13}\text{C}$  пыльцы 8 видов лиственных пород сибирской флоры разных лет сбора и сравнили их с погодными условиями года сбора пыльцы.

#### Методы исследования

Как уже было отмечено выше, в предлагаемом исследовании было проведено измерение величины  $\delta^{13}\text{C}$  в пыльце 8 видов сибирских лиственных пород деревьев, произрастающих в Томске и его окрестностях. Часть этих видов являются аборигенными для Сибири (*Betula pendula*, *Populus tremula*, *Salix caprea*, *Salix viminalis*). Остальные виды (*Ulmus laevis*, *Acer negundo*, *Tilia cordata*, *Populus nigra*) относятся к натурализовавшимся интродуцентам. В настоящее время эти виды широко используются в озеленении города и частично натурализовались в природе в окрестностях сибирских городов и посёлков.

В исследовании использовалась коллекция пыльцы, собиравшаяся в течение нескольких лет. Это позволило проследить изменение величины  $\delta^{13}\text{C}$  в пыльце различных видов по годам и сопоставить эти данные с погодными условиями года цветения и сбора пыльцы. Нами были собраны метеоданные по среднемесячным температурам двух весенних месяцев – апреля и мая, в течение которых большинство сибирских древесных видов проходят физиологические фазы от начала весеннего сокодвижения до цветения и формирования листы. Метеоданные взяты с сайта: [www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru).

Для изотопного исследования сухая пыльца растений тщательно очищалась от примесей (чешуек, пыльников и других растительных тканей) с помощью металлических сит с диаметром ячеек от 500 до 100 микрон. Затем 500 мкг очищенной пыльцы помещалось в оловянную капсулу и сжигалось в окислительно-восстановительном реакторе элементного анализатора Flash 2000 (ТомЦКП СО РАН). Выделившийся при горении  $\text{CO}_2$  анализировался в изотопном масс-спектрометре DELTA V Advantage (ТомЦКП СО РАН). Изотопный состав измерялся относительно стандартного газа, прокальброванного по стандарту целлюлозы IAEA-CH-3 (МАГАТЭ), и выражался по формуле

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{обр}} - (^{13}\tilde{N}/^{12}\tilde{N})_{\text{стан}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стан}}} \cdot 1000.$$

Величина  $\delta^{13}\text{C}$  представлена в тысячных долях (промилле), которые обозначаются значком «‰». Погрешность измерения не превышала  $\pm 0,1$  ‰.

#### Результаты и обсуждения

Проведённый анализ показал, что наблюдается увеличение содержания тяжелого изотопа  $^{13}\text{C}$  в ор-

ганическом веществе пыльцевых зёрен древесных пород, принадлежащих к лиственным видам при более высоких среднемесячных температурах в период цветения (таблица). Вероятно, более тёплые погодные условия стимулируют метаболические процессы в растениях этой группы, в результате чего, больше тяжелых изотопов  $^{13}\text{C}$  поглощается растениями во время фотосинтеза органического вещества из углекислого газа и воды.

Интенсивность метаболических процессов, видимо, зависит также от общего физиологического состояния организма растения. В случае, когда физиологическое состояние растения ослаблено по каким-то причинам, как, например, в случае с поваленной берёзой (*Betula pendula*) на горелом болоте (образец № 19), наблюдается резкое снижение интенсивности поглощения углекислого газа с тяжелым изотопом углерода до значения  $\delta^{13}\text{C} = -28,31$  ‰, по сравнению с растениями того же вида производящими пыльцу в не повреждённом состоянии в том же году ( $\delta^{13}\text{C} = -26,72$  ‰ и  $\delta^{13}\text{C} = -26,69$  ‰). Вероятно, что локальные экологические условия произрастания растения также влияют на интенсивность фракционирования тяжелого изотопа углерода. Так, растение, произрастающее на открытом солнечном склоне в Лагерном саду (образец № 3) усвоило значительно больше тяжелого изотопа  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C} = -24,57$  ‰) по сравнению с растением того же вида, но произрастающим в лесном окружении (образец № 4), для которого при тех же погодных условиях 2015 г. получено значение  $\delta^{13}\text{C} = -26,2$  ‰. В 2014 г. в условиях несколько более прохладной весны, по сравнению с 2015 г., одно и то же растение *Salix caprea* в лесном окружении ассимилировало несколько меньшее количество тяжелого изотопа  $^{13}\text{C}$  в состав своей пыльцы по сравнению с теплым 2015 г.

Можно отметить, что у 7 древесных видов (*Salix viminalis*, *Salix caprea*, *Populus nigra*, *Populus tremula*, *Ulmus laevis*, *Acer negundo*) при более тёплых погодных условиях апреля (в период начала сокодвижения) происходило более интенсивное усвоение тяжелого изотопа углерода при формировании и развитии пыльцевых зёрен, по сравнению с годом, когда среднемесячная температура апреля была ниже (таблица). В Сибири в периоды межсезонья (весна, осень) декады пониженных температур обычно сочетаются с увеличением количества осадков. Поэтому можно заключить, что наши исследования выявили прямую зависимость обилия стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце лиственных деревьев от температуры (чем выше температура, тем больше ассимилируется изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце) и подтвердили гипотезу негативной корреляции обилия атмосферных осадков с содержанием  $^{13}\text{C}$  в растениях [13, 14] на примере прямого наблюдения зависимости изотопного состава пыльцы от погодных условий.

В данном исследовании мы анализировали изотопный состав отдельных экземпляров растений, поэтому следует говорить об индивидуальной реак-

**Таблица.** Влияние погодных условий на величину  $\delta^{13}\text{C}$  в пыльцевых зёрнах лиственных пород деревьев (виды, цветущие в апреле, выделены жёлтым цветом, в мае – зелёным, в июле – сиреневым)

**Table.** Influence of weather conditions on value of  $\delta^{13}\text{C}$  in pollen grains of deciduous tree species (species flowering in April are marked by yellow, in May – by green, in July – by lilac)

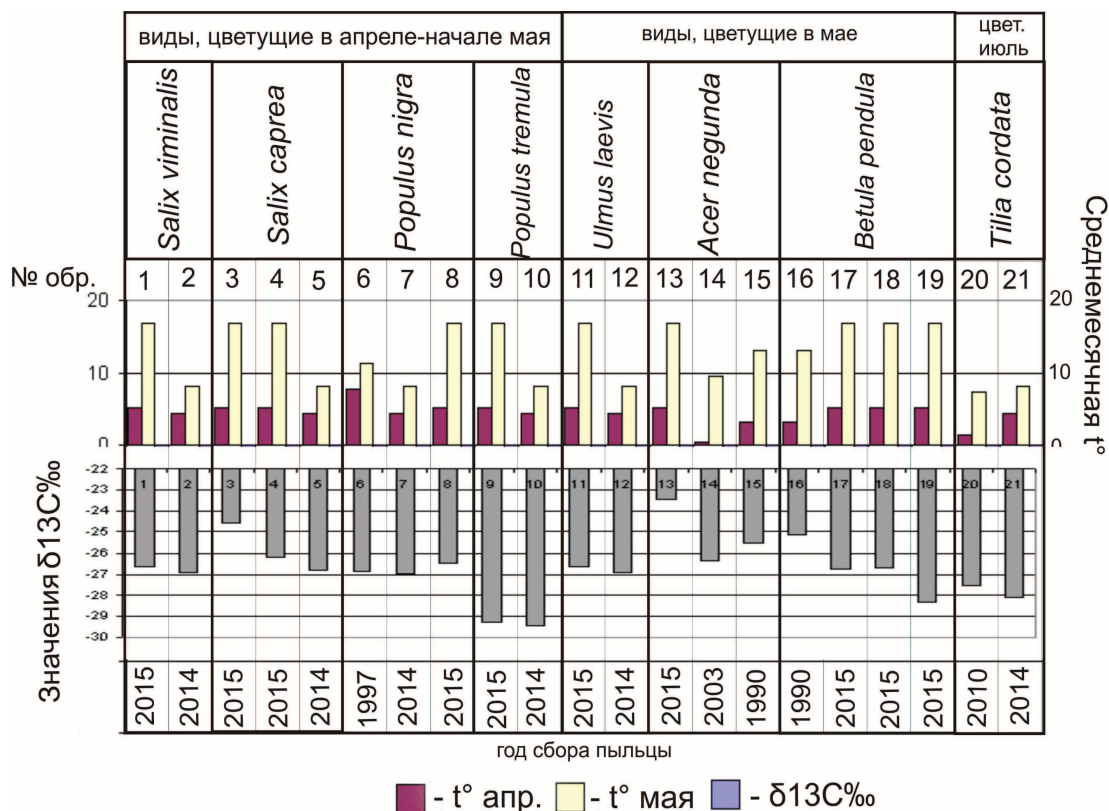
№ образца Sample	Вид Type	Место сбора Collecting point	Время сбора Collecting time	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$-(\delta^{13}\text{C}\text{‰}+20)$	Средн. $t^\circ$ апреля April mean temperature	Средн. $t^\circ$ мая May mean temperature
1	<i>Salix viminalis</i>	Томск, Академгородок	10.05.2015	-26,64	6,64	5	17
2	<i>Salix viminalis</i>	Томск, Академгородок Tomsk, Akademgorodok	29.04.2014	-26,95	6,95	4,4	8,1
3	<i>Salix caprea</i>	Томск, Лагерный сад	01.05.2015	-24,57	4,57	5	17
4	<i>Salix caprea</i>	Томск, Лагерный сад	05.05.2015	-26,2	6,2	5	17
5	<i>Salix caprea</i>	Томск, Академгородок Томск, Академгородок	28.04.2014	-26,83	6,83	4,4	8,1
6	<i>Populus nigra</i>	Томск, город	21.04.1997	-25,9	5,9	7,8	11,3
7	<i>Populus nigra</i>	Томск, город	27.04.2014	-26,99	6,99	4,4	8,1
8	<i>Populus nigra</i>	Томск, город Tomsk, city	03.05.2015	-26,45	6,45	5	17
9	<i>Populus tremula</i>	Томск, Академгородок	30.04.2015	-29,28	9,28	5	17
10	<i>Populus tremula</i>	Томск, Академгородок Tomsk, Akademgorodok	25.04.2014	-29,45	9,45	4,4	8,1
11	<i>Ulmus laevis</i>	Томск, Лагерный сад	01.05.2015	-26,67	6,67	5	17
12	<i>Ulmus laevis</i>	Томск, Лагерный сад Tomsk, Lagernyy sad	01.05.2014	-26,93	6,93	4,4	8,1
13	<i>Acer negundo</i>	Томск, город	11.05.2015	-23,45	3,45	5	17
14	<i>Acer negundo</i>	Томск, город	01.05.2003	-26,33	6,33	0,4	9,5
15	<i>Acer negundo</i>	Томск, город Tomsk, city	10.05.1990	-25,55	5,55	3,1	13,2
16	<i>Betula pendula</i>	Томск, город	04.05.1990	-25,1	5,1	3,1	13,2
17	<i>Betula pendula</i>	Томск, city	30.04.2015	-26,72	6,72	5	17
18	<i>Betula pendula</i>	Томск, Академгородок	08.05.2015	-26,68	6,68	5	17
19	<i>Betula pendula</i>	Томск, Академгородок Горелое болото Goreloe swamp	16.05.2015	-28,31	8,31	5	17
20	<i>Tilia cordata</i>	Томск, город	14.07.2010	-27,56	7,56	1,3	7,3
21	<i>Tilia cordata</i>	Томск, город Tomsk, city	15.07.2014	-28,10	8,1	4,4	8,1

ции растительных организмов на погодные условия в зависимости от локальных условий их произрастания. Если эти условия одинаковые, то теоретически можно ожидать близкие значения фракционирования изотопа углерода у разных индивидов одного вида. Именно такую картину мы получили для изотопного состава пыльцы, собранной в 2015 г. с двух отдельных берёз, произрастающих в лесном участке Академгородка (образцы № 17 и 18). В нашей коллекции пыльцы берёзы имелся образец, собранный 15 лет назад – в 1990 г. (образец № 16). Изотопный состав пыльцы этого образца содержал больше тяжелого изотопа углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -25,1\text{‰}$ ) по сравнению с образцами пыльцы берёзы, собранными в 2015 г., несмотря на то, что апрель 1990 г. был холоднее апреля 2015 г.

Более внимательное рассмотрение метеоданных показывает, что образец № 16 был собран в мае, а образец № 17 – в апреле. Если опираться на среднемесячные температуры тех месяцев, в которые была собрана пыльца берёзы в 1990 и 2015 гг., то отмеченное противоречие между фракциониро-

ванием изотопа углерода в пыльце берёзы и погодными условиями исчезает. Вероятно, холодный апрель 1990 г. сменился резким потеплением в мае, в начале которого и была собрана пыльца образца № 16, в результате чего было получено более высокое содержание тяжелого изотопа углерода в данном образце.

По нашим исследованиям не наблюдается отмеченной зависимости между содержанием тяжелого изотопа углерода и погодными условиями весны только у образцов пыльцы липы (образцы № 20 и 21). Скорее всего, это объясняется более поздним цветением (в июле месяце) этого экзотического для сибирской флоры древесного вида. В целом отмеченная закономерность увеличения содержания стабильного изотопа  $^{13}\text{C}$  в пыльце лиственных деревьев при более тёплых погодных условиях хорошо просматривается и графически (рисунок), хотя значимого коэффициента корреляции между двумя рядами показателей не получено, не считая ряда, частично захватывающего апрель и частично май (значения, отмеченные жёлтым цветом). От-



**Рисунок.** Зависимость величины  $\delta^{13}C$  в пыльце лиственных древесных видов от температурных условий апреля и мая года вегетации

**Figure.** Dependence of value of  $\delta^{13}C$  in pollen of deciduous tree species on temperature conditions in April and May of year of pollen formation

рицательный коэффициент корреляции этого ряда оказался значим и равен  $-0,45$  при  $N=17$  и  $p<0,05$ . Учитывая, что рассматриваемые виды растений цветут, сменяя друг друга, в разное время апреля и мая, такая картина вполне логична. Возможно, большая связь может быть получена при использовании не среднемесячных, а подекадных или среднесуточных температур конкретного дня сбора пыльцы.

### Заключение

Таким образом, проведённое исследование изотопного состава углерода в пыльце древесных видов лиственных пород сибирской флоры показало высокую чувствительность метода масс-спектрометрии изотопных отношений, проведённого с помощью элементного анализатора Flach 2000 (ТомЦКП СО РАН) и изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (ТомЦКП СО РАН), позволившего выявить, особенности локальных условий произрастания, физиологическое состояние растительных организмов и их реакцию на погодичную изменчивость температурно-влажностных условий весеннего периода. Исследование показало прямую зависимость обилия стабильного изотопа  $^{13}C$  в пыльце лиственных деревьев от температу-

ры (чем выше температуры, тем больше ассимилируется изотопа  $^{13}C$  в пыльце) и обратную зависимость от обилия осадков (чем больше осадков, тем меньше ассимилируется изотопа  $^{13}C$  в пыльце). Ослабленные растения и растения, произрастающие при меньшей солнечной освещённости, ассимилировали заметно меньшее количество изотопа  $^{13}C$  по сравнению со здоровыми растениями, произрастающими в более благоприятных условиях. Лиственные листопадные древесные виды бореальной зоны Сибири эволюционно сформировались в условиях резких сезонных изменений температурных и влажностных характеристик окружающей среды, отсюда, вероятно, их высокая чувствительность к малейшим изменениям весенней погоды. Более сложная зависимость содержания тяжёлых изотопов в пыльце от погодных условий наблюдается у хвойных древесных пород, прошедших более длительный эволюционный путь развития [22]. В настоящее время нами продолжается исследование изотопного состава пыльцы хвойных видов флоры Сибири и сопредельных регионов, что в дальнейшем позволит использовать тонкие измерения изотопных отношений в пыльцевой фракции осадков для палеостратиграфических исследований при разведке георесурсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stable isotopes in plant ecology / T.E. Dawson, S. Mambelli, A.H. Plamboeck, P.H. Templer, K.P. Tu // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 2002. – № 33. – P. 507–559.
2. Beerling D.J., Royer D.L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2002. – № 30. – P. 527–556.
3. Физиология растений // *Онлайн-энциклопедия*. URL: <http://www.fizrast.ru/fotosintez/stapy/prevrashenie-ugleroda/C4-put.html> (дата обращения: 11.10.2015).
4. Schidlowski M. Paleobiological and biogeochemical vestiges of early terrestrial biota: baseline for evaluation of extraterrestrial evidence / B. Hoover et al. // *Perspectives in Astrobiology*. – R. IOS Press, 2005. – P. 146–169.
5. Ward J.K., Dawson T.E., Ehleringer J.K. Responses of acer negundo genders to interannual differences in water availability determined from carbon isotope ratios of tree ring cellulose // *Tree Physiology*. – 2002. – № 22 (5). – P. 339–346.
6. Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. – 1980. – № 40. – P. 503–537.
7. Schleser G.H. Parameters determining isotope ratios in plants / B. Frenzel, B. Stauffer, M.M. Weiss // *Paläoklimaforzschung* 15. – Strasburg, 1995. – P. 71–96.
8. Зыкин А.М. Теоретические основы изотопной масс-спектропии в биологии. – Пушчино: Фотон-век, 2010. – 224 с.
9. Li M.R., Wedin D.A., Tieszen L.L. C-3 and C-4 photosynthesis in Cyperus (Cyperaceae) in temperate eastern North America // *Canadian Journal of Botany*. – 1999. – № 77 (2). – P. 209–218.
10. Scott L. Grassland development under glacial and interglacial conditions in southern Africa: review of pollen, phytolith and isotope evidence // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2002. – № 177 (1–2). – P. 47–57.
11. CO<sub>2</sub>- and temperature-controlled altitudinal shifts of C4- and C3-dominated grasslands allow reconstruction of palaeoatmospheric pCO<sub>2</sub> / A. Boom, R. Marchant, H. Hoogheemstra, J.S. Sinninghe-Famste // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2002. – № 177 (1–2). – P. 151–168.
12. Williams T.G., Flangan L.B. Effect of changes in water content on photosynthesis transpiration and discrimination against <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> and C<sup>18</sup>O<sup>16</sup>O in Pleurozium and Sphagnum // *Oecologia*. – 1996. – № 108 (1). – P. 38–46.
13. Carbon isotope of bulk organic matter a proxy for precipitation in the arid semiarid central East Asian / X. Lee, Z. Feng, L. Guo, L. Wang, L. Jin, Y. Huang, M. Chopping, D. Huang, W. Jiang, Q. Jiang, H. Cheng // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2005. – № 19 (4). – P. 1–8.
14. Paleovegetation reconstruction using δ<sup>13</sup>C of soil organic matter / G. Wang, X. Feng, J. Hang, L. Zhou, W. Tan, F. Su // *Biogeosciences*. – 2008. – № 5. – P. 1325–1337.
15. Jahren A.H. The carbon stable isotope composition of pollen // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 2004. – № 132. – P. 291–313.
16. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a δ<sup>13</sup>C time series from peat cellulose / Y.T. Hong, Z.G. Wang, H.B. Jiang, Q.H. Lin, B. Hong, Y.X. Zhu, Y. Wang, L.S. Xu, X.T. Leng, H.D. Li // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2001. – № 185. – P. 111–119.
17. Hong B., Lin Q.H., Hong Y.T. Interconnections between the Asian monsoon, ENSO and high northern latitude climate during the Holocene // *Chinese Science Bulletin*. – 2006. – № 51. – P. 11–19.
18. Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14 000 years / Y.T. Hong, B. Hong, Q.H. Lin, Y.X. Shibata, Y.X. Zhu, X.T. Leng, Y. Wang // *Quaternary Science Reviews*. – 2009. – № 28. – P. 840–849.
19. Stable carbon isotope composition of Poaceae pollen and its potential in paleovegetational reconstructions / R.G. Amundsen, R.R. Evett, A.H. Jahren, J. Bartolome // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 1997. – № 99 (1). – P. 17–24.
20. Carbon isotopic ratios of pollen: interest for palaeovegetations reconstructions / C. Descolas-Gros, M. Calleja, P. Cour, P. Richard, C. Perruchetti, P. Jame // *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie III. Fascicule A. Sciences de la Terre et des Planetes*. – 2001. – № 332 (12). – P. 755–760.
21. Loader N.J., Hemming D.L. Spatial variation in pollen δ<sup>13</sup>C correlation with temperature and seasonal development timing // *Holocene*. – 2001. – № 11 (5). – P. 587–592.
22. Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 225 с.

Поступила 09.11.2015 г.

UDC 581.132.8:582.091:551.515

## VARIABILITY OF CONTENT OF STABLE ISOTOPES OF CARBON IN POLLEN OF DECIDUOUS TREE SPECIES DEPENDING ON WEATHER CONDITIONS OF VEGETATIVE SEASON

**Tatyana A. Blyakharchuk,**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskij Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: tarun5@rambler.ru

**Galina V. Simonova,**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskij Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: galina\_simonova@inbox.ru

**Olga V. Vetrova,**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskij Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: vetrovao.v@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to find more robust markers of paleoclimatic change in natural archives (peat, sapropel and mineral sediments) for paleogeographic research in Siberian region, which can be used for verification of stratigraphic structure of sediments during exploration of geological resources.

**The main aim of the study:** to reveal the prospects of use of stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  detected in pollen of deciduous tree species of Siberian flora for paleoclimatic investigations.

**The methods used in the study:** for this aim the amount of stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  was detected in pollen of eight tree species from deciduous clade collected in different years and compared with weather condition of spring time during year of pollen collection. Dry cleaned pollen of selected tree species was burned in redox reactor of element analyzer Flash 2000.  $\text{CO}_2$  emitted during combustion was analyzed in isotope mass-spectrometer DELTA Advantage in Tom CCU SB RAS. The results of stable isotope measurements were compared later with average month temperatures of April and May mentioned for year when pollen was collected.

**The results.** The authors found that content of stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  in pollen of deciduous trees of Siberian flora is a perspective indicator of weather conditions during pollen maturation and hence for paleoclimatic research. The investigation showed straight dependence of amount of stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  in pollen of deciduous trees on temperature (higher the temperature in period of maturation of pollen is, more  $^{13}\text{C}$  isotope was accumulated by plants) and reverse dependence on amount of precipitation (more precipitation was during maturation of pollen, less carbon isotope  $^{13}\text{C}$  was accumulated by plants). Weakened plants and plants growing under less sunlight conditions accumulated notably less amount of stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  in comparison with healthy plants growing in more favorable environments.

#### Key words:

Pollen, tree species, carbon stable isotope  $^{13}\text{C}$ , isotopic fractionation of stable isotopes, temperature, precipitation, paleoclimate.

#### REFERENCES

- Dawson T.E., Mambelli S., Plamboeck A.H., Templer P.H., Tu K.P. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, no. 33, pp. 507–559.
- Beerling D.J., Royer D.L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2002, no. 30, pp. 527–556.
- Fiziologiya rasteniy [Physiology of plants]. Available at: <http://www.fizrast.ru/fotosintez/stapy/prevrasheniye-ugleroda/C4-put.html> (accessed 11 October 2015).
- Schidlowski M. Paleobiological and biogeochemical vestiges of early terrestrial biota: baseline for evaluation of extraterrestrial evidence. In B. Hoover et al. (Eds.). *Perspectives in Astrobiology*. R IOS Press, 2005. pp. 146–169.
- Ward J.K., Dawson T.E., Ehleringer J.K. Responses of acer negundo genders to interannual differences in water availability determined from carbon isotope ratios of tree ring cellulose. *Tree Physiology*, 2002, no. 22 (5), pp. 339–346.
- Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1980, no. 40, pp. 503–537.
- Schleser G.H. Parameters determining isotope ratios in plants. In B. Frenzel, B. Stauffer, M.M. Weiss (Eds.). *Paläoklimaforschung 15*. Strassburg, 1995, pp. 71–96.
- Zykin A.M. Teoreticheskie osnovy izotopnoy mass-spektroskopii v biologii [Theoretical bases of isotopic mass-spectroscopy in biology]. Pushchino, Foton-vek Publ., 2010. 224 p.
- Li M.R., Wedin D.A., Tieszen L.L. C-3 and C-4 photosynthesis in Cyperus (Cyperaceae) in temperate eastern North America. *Canadian Journal of Botany*, 1999, no. 77 (2), pp. 209–218.
- Scott L. Grassland development under glacial and interglacial conditions in southern Africa: review of pollen, phytolith and isotope evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, no. 177 (1–2), pp. 47–57.
- Boom A., Marchant R., Hoogheemstra H., Sinninghe-Famste J.S.  $\text{CO}_2$ - and temperature-controlled altitudinal shifts of C4- and C3-dominated grasslands allow reconstruction of palaeoatmospheric  $p\text{CO}_2$ . *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, no. 177 (1–2), pp. 151–168.
- Williams T.G., Flangan L.B. Effect of changes in water content on photosynthesis transpiration and discrimination against  $^{13}\text{CO}_2$  and  $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$  in Pleurozium and Sphagnum. *Oecologia*, 1996, no. 108 (1), pp. 38–46.
- Lee X., Feng Z., Guo L., Wang L., Jin L., Huang Y., Chopping M., Huang D., Jiang W., Jiang Q., Cheng H. Carbon isotope of bulk organic matter a proxy for precipitation in the arid semiarid central East Asian. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, no. 19 (4), pp. 1–8.
- Wang G., Feng X., Hang J., Zhou L., Tan W., Su. F. Paleovegetation reconstruction using  $\delta^{13}\text{C}$  of soil organic matter. *Biogeosciences*, 2008, no. 5, pp. 1325–1337.
- Jahren A.H. The carbon stable isotope composition of pollen. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2004, no. 132, pp. 291–313.
- Hong Y.T., Wang Z.G., Jiang H.B., Lin Q.H., Hong B., Zhu Y.X., Wang Y., Xu L.S., Leng X.T., Li H.D. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a  $\delta^{13}\text{C}$  time series from peat cellulose. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, no. 185, pp. 111–119.
- Hong B., Lin Q.H., Hong Y.T. Interconnections between the Asian monsoon, ENSO, and high northern latitude climate during the Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 2006, no. 51, pp. 11–19.
- Hong Y.T., Hong B., Lin Q.H., Shibata Y.X., Zhu Y.X., Leng X.T., Wang Y. Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14 000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2009, no. 28, pp. 840–849.
- Amundsen R.G., Evett R.R., Jahren A.H., Bartolome J. Stable carbon isotope composition of Poaceae pollen and its potential in paleovegetational reconstructions. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1997, no. 99 (1), pp. 17–24.
- Descolas-Gros C., Calleja M., Cour P., Richard P., Perruchietti C., Jame P. Carbon isotopic ratios of pollen: interest for palaeovegetations reconstructions. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie III. Fascicule A. Sciences de la Terre et des Planetes*, 2001, no. 332 (12), pp. 755–760.
- Loader N.J., Hemming D.L. Spatial variation in pollen  $\delta^{13}\text{C}$  correlation with temperature and seasonal development timing. *Holocene*, 2001, no. 11 (5), pp. 587–592.
- Krylov G.V. Lesa Zapadnoy Sibiri [Forests of West Siberia]. Moscow, AS USSR Publ., 1961. 225 p.

Received: 09 November 2015.

УДК 536.24

## УГОЛЬНЫЙ СЛОЙ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ СМЕШАННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ I И II РОДА

**Саломатов Владимир Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник  
Института теплофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,  
пр. акад. Лаврентьева, 1. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Карелин Вадим Александрович,**

магистрант Национального исследовательского Новосибирского  
государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск,  
ул. Пирогова, 2. E-mail: vad2hen@mail.ru

**Заворин Александр Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения  
и парогенераторных установок Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

**Саломатов Василий Владимирович,**

канд. физ.-мат. наук, ведущий программист Института теплофизики  
СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 1.  
E-mail: vvsalomatov@mail.ru

**Пащенко Сергей Эдуардович,**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Национального  
исследовательского Новосибирского государственного университета,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.  
E-mail: pashenko-ecolog@yandex.ru

**Актуальность работы** обусловлена перспективностью применения СВЧ-излучения в технологиях энергетического топливоиспользования на стадиях подготовки твердого топлива к пылеугольному сжиганию, включая подсушку и предгорелочную термическую обработку. Немногочисленные известные результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о наличии структурных эффектов, приводящих к повышению реакционной способности и уменьшению недожога топлива, а также к сокращению генерации токсинов.

**Цель работы.** Получение аналитического выражения для температурного поля в угольном массиве, необходимого для параметрического анализа технологических условий микроволнового воздействия.

**Методы исследования.** Построение аналитически строгих задач теплопереноса, решение которых, как правило, возможно только в условиях существенных упрощений. При принятом постоянстве электрофизических и технологических свойств угля физическая картина процесса определяется падающей на угольный слой плоской электромагнитной волной, которая формирует внутренний источник тепла по закону Бугера. Уравнение энергии в форме Фурье в этом случае рассматривается независимо от уравнений электродинамики Максвелла. В данной постановке решение выделенных задач проведено с помощью метода интегрального преобразования Лапласа.

**Результаты.** Выведенные аналитические решения по температурным полям получены при смешанных граничных условиях с достаточно произвольными изменениями во времени температуры одной поверхности и плотности потока на противоположной границе. Для ряда частных случаев на этой основе может быть получен обширный ряд упрощенных решений, доступных для параметрического анализа, с обоснованием оптимальных управляющих параметров технологии, востребованных инженерной практикой при проектной разработке и эксплуатации СВЧ-систем обработки твердого топлива в энергетике, а также в углехимии.

### **Ключевые слова:**

Уголь, микроволновая энергия, уравнения Максвелла, уравнение теплопроводности Фурье, закон Бугера, смешанные граничные условия, тепловой режим.

### **Введение**

Новые области применения СВЧ-излучения связаны с тем, что данное излучение проявляет свои специфические особенности по сравнению с традиционными способами нагрева, а именно: селективность поглощения в зависимости от диэлек-

трических свойств материала, возможность модулировать энергию в пространстве и времени, использовать ее в сочетании с другими источниками энергии для получения оптимальных температурных режимов. Результаты практического применения микроволновой энергии показали сокраще-

ние времени проведения технологического процесса нагрева, продемонстрировали энергоэффективность использования СВЧ-энергии, позволили достичь объемного нагрева вещества, дали возможность интенсифицировать технологию нагрева [1].

К настоящему моменту Э. Окрессом, Г. Пюшнером, А.Н. Диденко и др. [1–7] были выполнены фундаментальные теоретические и экспериментальные работы по воздействию сверхвысокочастотного излучения на материалы, включая и уголь. Исследование СВЧ-нагрева диэлектрических материалов с разными целевыми установками проводили А.В. Нетушил, Ю.С. Архангельский, Р.Г. Ругинец, Р.Ш. Килькеев, С.К. Брыков, Л.Э. Рикенглаз и др. [8–18]. Математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей при СВЧ-нагреве диэлектрических сред выполнили В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, Т.К. Гараев и др. специалисты Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева [18, 19]. В Иркутском государственном техническом университете Н.П. Коноваловым, П.Н. Коноваловым, В.В. Федчишиным, А.А. Хайдуровой проводились экспериментальные исследования влияния СВЧ-излучения на уголь [6, 20, 21]. Проведенными выше исследованиями проблема диэлектрического нагрева электромагнитным излучением не исчерпывается. Не вызывает сомнения необходимость и целесообразность выполнения дальнейшей программы теории СВЧ-нагрева.

Метод СВЧ-нагрева основан на поглощении энергии веществом. Электромагнитное поле, проникая в объект, взаимодействует с заряженными частицами тела и вызывает их колебания, что генерирует излучение этих заряженных частиц. Совокупность таких микроскопических процессов приводит к поглощению энергии поля в объекте. Диэлектрический нагрев имеет существенное преимущество, так как позволяет:

- концентрировать очень большие мощности в малых объемах;
- получать равномерный нагрев материала даже с низкой теплопроводностью при большой интенсивности нагрева;
- легко осуществлять избирательный нагрев;
- регулировать заданный температурный режим и др.

Наибольший интерес для теории и практики представляют, прежде всего, аналитически строгие решения задач СВЧ-нагрева. С их помощью легко осуществляется параметрический анализ микроволнового нагрева, проводятся экспресс-расчеты тепловых процессов, выявляются фундаментальные закономерности. Цель данного исследования связана с поиском таких решений, в частности с часто встречающимися на практике случаями СВЧ-воздействия на угольный слой со смешанными условиями теплоотвода с его внешних поверхностей.

## 1. Решение первой задачи

Задача связана с поиском температурного поля при наличии произвольных по времени граничных условий I и II рода. При этом решению подлежит следующая система уравнений микроволнового нагрева угольного слоя:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-kx}, \quad (1.1)$$

$$T(x,0) = f(x), \quad (1.2)$$

$$T(0,t) = T_1(t), \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial T(\delta,t)}{\partial x} = \frac{q_2(t)}{\lambda}, \quad (1.4)$$

где  $T(x,t)$  – текущее температурное поле, К;  $x$  – поперечная координата, м;  $t$  – время, с;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $q_{v_0}$  – максимальное значение внутреннего источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, кДж/кг·К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент поглощения в законе Бугера, 1/м;  $T_1(t)$  – переменная по времени температура наружной поверхности, К;  $q_2(t)$  – нестационарная плотность теплого потока на внутренней поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность угля, Вт/м·К.

Схема этой задачи представлена на рис. 1.

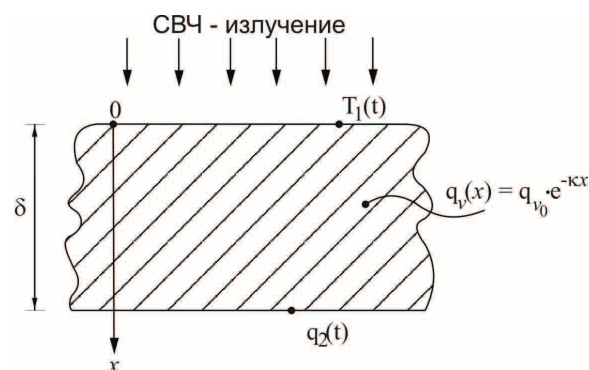


Рис. 1. Схема задачи микроволнового нагрева угольной пластины при смешанных граничных условиях

Fig. 1. Scheme of microwave heating of coal plates with mixed boundary conditions

Для упрощения процедуры построения итогового решения системы (1.1)–(1.4) переведем эту систему с помощью нового преобразования

$$u(x,t) = T(x,t) - T_1(t) - x \frac{q_2(t)}{\lambda} \quad (1.5)$$

к виду с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + q_v(x,t), \quad (1.6)$$

где  $q_v(x,t) = \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-kx} - T_1'(t) - x \frac{q_2'(t)}{\lambda}$ , «'» – знак первой производной по времени.

$$u(x,0) = F(x), \quad (1.7)$$



$$F(x) = f(x) - T_1(0) - x \frac{q_2(0)}{\lambda},$$

$$u(0,t)=0, \tag{1.8}$$

$$\frac{\partial u(\delta,t)}{\partial x} = 0. \tag{1.9}$$

Применяя к (1.6)–(1.9) трансформанту интегрального преобразования Лапласа [22], решая преобразованную задачу относительно изображения температурной функции и переходя к оригиналам по правилам обратного преобразования, получим выражение для температурного поля угольного слоя в достаточно общем виде:

$$T(x,t) =$$

$$= \int_0^t \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t-\tau}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{2\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{2\delta}\right) \end{array} \right] \times \right. \tag{1.10}$$

$$\left. \times \left[ \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa\eta} - T_1'(\tau) - \eta \frac{q_2'(\tau)}{\lambda} \right] d\eta d\tau \right\} +$$

$$+ \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{2\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{2\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{2\delta}\right) \end{array} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \left[ f(\eta) - T_1(0) - \eta \frac{q_2(0)}{\lambda} \right] d\eta \right\}$$

## 2. Решение второй задачи

Рассмотрим еще один пример разогрева угольной пластины микроволновым излучением в условиях смешанного отвода тепла с граничных поверхностей, который допускает получение строгого аналитического решения. Схема такой задачи приведена на рис. 2.

Математическая постановка задачи состоит из следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa x}, \tag{2.1}$$

$$T(x,0)=f(x), \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \frac{q_1(t)}{\lambda}, \tag{2.3}$$

$$T(\delta,t)=T_2(t). \tag{2.4}$$

С помощью новой независимой переменной

$$u(x,t) = T(x,t) - (x-\delta) \frac{q_1(t)}{\lambda} - T_2(t) \tag{2.5}$$

переведем систему (2.1)–(2.4) к более простой с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + q_v(x,t), \tag{2.6}$$

$$\text{где } q_v(x,t) = \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa x} - (x-\delta) \frac{q_1'(t)}{\lambda} - T_2'(t), \text{ «} \prime \text{» - знак}$$

первой производной по времени,

$$u(x,0)=F(x), \tag{2.7}$$

$$\text{где } F(x) = f(x) - (x-\delta) \frac{q_1(0)}{\lambda} - T_2(0),$$

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0, \tag{2.8}$$

$$u(\delta,t)=0. \tag{2.9}$$

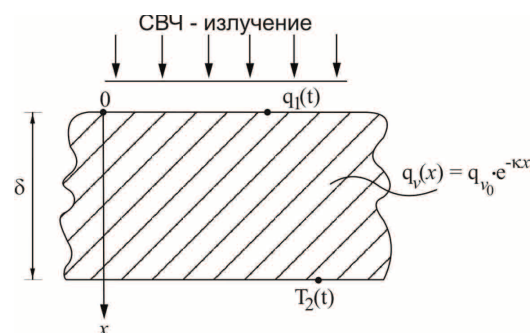


Рис. 2. Схема задачи нагрева неограниченного угольного слоя энергией СВЧ при смешанных граничных условиях теплоотвода

Fig. 2. Scheme of heating of unlimited coal layer of microwave energy with mixed boundary conditions of the heat sink

Решение системы уравнений (2.6)–(2.9) строится наиболее эффективно с применением интегрального преобразования Лапласа [22]. Переводя сформулированную задачу в область изображений, решая её относительно изображения искомой температурной функции, возвращаясь к оригиналам по правилам обратного преобразования, получим выражение температурного поля в угольном слое в наиболее общем виде:

$$T(x,t) =$$

$$= \int_0^t \int_0^\delta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2\pi^2 \frac{t-\tau}{\delta^2}} \left[ \begin{array}{l} \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{4\delta}\right) + \\ +\cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{4\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{4\delta}\right) - \\ -\cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{4\delta}\right) \end{array} \right] \times \right. \tag{2.10}$$

$$\left. \times \left[ \frac{q_{v_0}}{c\rho} e^{-\kappa\eta} - (\eta-\delta) \frac{q_1(\tau)}{\lambda} - T_2(\tau) \right] d\eta d\tau \right\} +$$

$$\begin{aligned}
 & +d\eta d\tau + \\
 & + \int_0^{\delta} 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-an^2 \pi^2 \frac{t}{\delta}} \times \\
 & \left. \left\{ \begin{aligned} & \left[ \begin{aligned} & \cos\left(n\pi \frac{x-\eta}{4\delta}\right) + \\ & + \cos\left(n\pi \frac{x+\eta}{4\delta}\right) - \\ & - \cos\left(n\pi \frac{x+\eta-2\delta}{4\delta}\right) - \\ & \cos\left(n\pi \frac{x-\eta-2\delta}{4\delta}\right) \end{aligned} \right] \times \\ & \times \left[ f(\eta) - (\eta-\delta) \frac{q_1(0)}{\lambda} - T_2(0) \right] d\eta \end{aligned} \right\} \times
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

### Обсуждение

Выведенные аналитически строгие решения по температурным полям (1.10) и (2.10) достаточно общего вида допускают широкий спектр частных упрощенных решений с возможностью их детального параметрического анализа. Выведенная информация по температурным полям является базовой для оценки параметров СВЧ-зажигания угольного топлива, определения терморазрушающих напряжений, поиска управляющих воздействий автоматизированного СВЧ-нагрева, реализации оптимальных параметров СВЧ-технологии для угольных массивов и др.

Полученные решения несут в себе важную информацию, так как позволяют найти целый ряд параметров технологии СВЧ-нагрева угольного массива:

- 1) исследование на экстремум температурных функций  $T(x,t)$  в (1.10) и (2.10) позволяет вычи-

слить координату максимальной температуры, а подставив ее значение в текущую функцию температурного поля, – определить и само значение максимальной температуры;

- 2) момент зажигания находится из равенства максимальной температуры угольного слоя температуре зажигания;
- 3) уровень опасных терморазрушающих напряжений находится из максимальной разности температур по угольному слою:  $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min}$ ;
- 4) другие технологические параметры, в частности по оптимизации и автоматизации.

### Заключение

Построены аналитически строгие решения двух задач микроволнового нагрева угольного слоя со смешанными и с достаточно произвольными граничными условиями I и II рода. Возможность получения таких решений связана с тем, что в условиях постоянства электрофизических и теплофизических характеристик угля или принятия их постоянными на отдельных интервалах задача микроволнового нагрева решается отдельно от электродинамической задачи Максвелла. Сам внутренний источник тепла от поглощения плоской электромагнитной волны СВЧ подчиняется закону Бугера. При решении эффективен метод интегрального преобразования Лапласа. Полученное обобщенное решение температурных задач позволяет выдать широкий спектр частных результатов, которые востребованы инженерной практикой. Последние являются фундаментом создания энергоэффективных, экологически щадящих и биологически безопасных СВЧ-технологий тепловой обработки угольных массивов.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 13-08-01458.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пащенко С.Э., Саломатов В.В. Угольные технологии с использованием СВЧ-излучения // Горение и плазмохимия. – 2014. – Т. 12. – № 2. – С. 77–96.
2. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 446 с.
3. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
4. СВЧ-энергетика / под ред. Э. Окреса. – М.: Мир, 1971. – 272 с.
5. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот: пер. с англ. – М.: Энергия, 1968. – 311 с.
6. Коновалов Н.П. Технология деструкции бурых углей методом нагрева энергией сверхвысокой частоты. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. – 97 с.
7. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пащенко С.Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // Инж.-физ. журнал. – 2012. – № 85 (3). – С. 535–549.
8. Иваницкий В.В. О возможности применения сверхвысокочастотных методов нагрева материалов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2000. – № 3–4. – С. 42–46.
9. Семенов А.С., Байбури В.В. СВЧ-энергия и ее применение. Особенности, оборудование, технологические процессы. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. – 114 с.
10. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree / N. Seyhun, H. Ramaswamy, G. Sumnu, S. Sahin, J. Ahmed // Journal of Food Engineering. – 2009. – № 92 (3). – P. 339–344.
11. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2005. – № 22 (2). – P. 153–163.
12. Коломейцев В.А., Комаров В.В. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1997. – 160 с.
13. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил, Б.Я. Жуховицкий, В.Н. Кудин, Е.П. Парини. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.
14. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
15. Ругинец Р.Г., Килькеев Р.Ш. Локализация тепловыделения в диэлектрике при воздействии СВЧ электромагнитного поля // Инж.-физ. журнал. – 1989. – № 4. – С. 645–650.

16. Ругинец Р.Г., Брыков С.К., Лохару Э.Х. Тепловые режимы при сверхвысокочастотном нагреве диэлектриков // Инж.-физ. журнал. – 1990. – № 59 (5). – С. 853–858.
17. Рикенглаз Л.Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями // Инж.-физ. журнал. – 1974. – 27 (6). – С. 1061–1068.
18. Анфиногентов В.И. Математическое моделирование СВЧ-нагрева диэлектриков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 140 с.
19. Анфиногентов В.И., Гараев Т.К., Морозов Г.А. Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2002. – № 3 (27). – С. 21–22.
20. Хайдурова А.А., Федчишин В.В., Коновалов Н.П. Микроволновая сушка бурых углей и повышение их технологических характеристик // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 1–2. – С. 31–35.
21. Хайдурова А.А., Коновалов Н.П., Федчишин В.В. Воздействие микроволновой энергии на бурый уголь для улучшения его технологических характеристик // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 109–113.
22. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

Поступила 23.10.2015 г.

UDC 536.24

## COAL LAYER UNDER MICROWAVE HEATING: ANALYTICAL STUDY UNDER MIXED BOUNDARY CONDITIONS I AND II OF THE GENUS

**Vladimir V. Salomatov,**

Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue,  
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vvs@itp.nsc.ru

**Vadim A. Karelin,**

National Research Novosibirsk State University, 2, Pirogov Street, Novosibirsk,  
630090, Russia. E-mail: vad2hen@mail.ru

**Alexander S. Zavorin,**

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

**Vasily V. Salomatov,**

Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev Avenue,  
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: vvsalomatov@mail.ru

**Sergey E. Pashchenko,**

National Research Novosibirsk State University, 2, Pirogov Street, Novosibirsk,  
630090, Russia. E-mail: pashenko-ecolog@yandex.ru

*The relevance of the work is due to the prospect of the use of microwave radiation in the energy technologies of fuel use at the stages of preparation of solid fuels for coal-fired incineration, including drying and heat treatment. A few well-known results of laboratory experiments indicate structural effects, resulting in increased reactivity and reduction of unburnt fuel.*

**Objective:** to obtain an analytical expression for the temperature field in the coal array required for parametric analysis of technological conditions of microwave exposure.

**Methods:** construction of analytically rigorous heat transfer problems, the solution of which is usually possible only in conditions of significant simplifications. If adopted by the constancy of the electrical and technological properties of coal physical picture of the process is determined by the incident on the coal layer of a plane electromagnetic wave that generates internal heat source of Buger law. The energy equation in the form of Fourier is solved independently of Maxwell equations. In this formulation the solution of allocated tasks is carried out by the method of integral transformation of Laplace.

**Results.** The derived analytical solutions of temperature fields are received with mixed boundary conditions with fairly arbitrary changes in time and temperature of a surface flux density of fire on the border. For some special cases on this basis can be obtained an extensive series of simplified solutions available for parametric analysis of the rationale of optimal control parameters of the technology demanded by the engineering practice in project development and operation of microwave systems for processing of solid fuels in the energy sector.

**Key words:**

Coal, microwave energy, Maxwell equations, Fourier heat equation, Buger law, mixed boundary conditions, thermal conditions.

## REFERENCES

1. Salomatov V.I., Sladkov S.O., Pashchenko S.E., Salomatov V.V. Ugolnye tekhnologii s ispolzovaniem SVCh-izlucheniya [Microwave technologies in coal power engineering]. *Gorenie i Plazmohimiya*, 2014, vol.12, no. 2, pp. 77–96.
2. Didenko A.N. *SVCh-energetika: teoriya i praktika* [SHF-energetics: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 446 p.
3. Didenko A.N., Zverev B.V. *SVCh-energetika* [Microwave energy]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 264 p.
4. *SVCh-energetika* [Microwave energy]. Ed. by E. Okressa. Moscow, Mir Publ., 1971. 272 p.
5. Pyushner G. *Nagrev energiy sverkhvysokikh chastot* [Heating microwave energy]. Transl. from English. Moscow, Energiya Publ., 1968. 311 p.
6. Kononov N.P. *Tekhnologiya destruktivnoy burykh ugley metodom nagreva energiy sverkhvysokoy chastoty* [Microwave heating brown coal degradation technology]. Irkutsk, Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2000. 97 p.
7. Salomatov V.V., Sladkov S.O., Pashchenko S.E. SVCh-tekhnologii v ugolnoy energetike [Microwave technology in coal energy]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, no. 85 (3), pp. 535–549.
8. Ivanitskiy V.V. O vozmozhnosti primeneniya sverkhvysokochastotnykh metodov nagreva materialov [Possibility of using of microwave heating methods of materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela*, 2000, no. 3–4, pp. 42–46.
9. Semenov A.S., Bayburin V.B. *SVCh-energiya i ee primeneniye. Osobennosti, oborudovaniye, tekhnologicheskiye protsessy* [Microwave energy and its application. Features, equipment, technological processes]. Saratov, Publishing House of Saratov University, 1999. 114 p.
10. Seyhun N., Ramaswamy H., Sumnu G., Sahin S., Ahmed J. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree. *Journal of Food Engineering*, 2009, no. 92 (3), pp. 339–344.
11. Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modeling and simulation of drying phenomena with rheological behavior. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2005, no. 22 (2), pp. 153–163.
12. Kolomeyts V.A., Komarov V.V. *Mikrovolnovyye sistemy s ravnomernym obemnym nagrevom* [Microwave systems with a uniform volumetric heating]. Saratov, Publishing House of Saratov State Technical University, 1997. 160 p.
13. Netushil A.V., Zhukhovitskiy B.Ya., Kudin V.N., Parini E.P. *Vysokochastotnyy nagrev dielektrikov i poluprovodnikov* [The high-frequency heating of dielectrics and semiconductors]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1959. 480 p.
14. Arkhangelskiy Yu.S., Devyatkin I.I. *Sverkhvysokochastotnyye nagrevatelnye ustanovki dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Microwave heating devices for intensification of technological processes]. Saratov, Publishing House of Saratov University, 1983. 140 p.
15. Ruginets R.G., Kilkeev R.Sh. Lokalizatsiya teplovydeleniya v dielektrike pri vozdeystvii SVCh elektromagnitnogo polya [Localization of heat when exposed to a dielectric microwave electromagnetic field]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1989, no. 56 (4), pp. 645–650.
16. Ruginets R.G., Brykov S.K., Lokharu E.Kh. Teplovyye rezhimy pri sverkhvysokochastotnom nagreve dielektrikov [Thermal regimes during the microwave heating of dielectrics]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1990, no. 59 (5), pp. 853–858.
17. Rikenglaz L.E. K teorii nagreva dielektrikov moshchnymi elektromagnitnymi polyami [On the theory of dielectric heating of powerful electromagnetic fields]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1974, no. 27 (6), pp. 1061–1068.
18. Anfingentov V.I. *Matematicheskoe modelirovaniye SVCh-nagreva dielektrikov* [Mathematical modeling of microwave heating of dielectrics]. Kazan, Publishing House of Kazan State University, 2006. 140 p.
19. Anfingentov V.I., Garaev T.K., Morozov G.A. Ob odnoy zadache teorii SVCh nagreva dielektrikov [A problem in the theory of microwave dielectric heating]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2002, no. 3 (27), pp. 21–22.
20. Khaydurova A.A., Fedchishin V.V., Kononov N.P. Mikrovolnovaya sushka burykh ugley i povysheniye ikh tekhnologicheskikh kharakteristik [Microwave drying of brown coal and increasing its technological characteristics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2010, no. 1–2, pp. 31–35.
21. Khaydurova A.A., Kononov N.P., Fedchishin V.V. Vozdeystvie mikrovolnovoy energii na buryy ugol dlya uluchsheniya ego tekhnologicheskikh kharakteristik [Effects of microwave energy to the brown coal to improve its processing characteristics]. *Teplofizicheskiye osnovyy energeticheskikh tekhnologiy* [Thermophysical basics of energy technologies]. Tomsk, TPU Publ., 2009, pp. 109–113.
22. Dech G. *Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasa* [Guide to the practical application of the Laplace transform]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 288 p.

Received: 23 October 2015.

УДК 621.316.722.076.12; 504.05; 504

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПОЛИТИКЕ НА ЭТАПЕ СОЗДАНИЯ В РОССИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТЬЮ

**Балабанов Михаил Станиславович,**

главный инженер ООО «Международная энергосберегающая корпорация»,  
Россия, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 5-я Линия В.О., 68, корп. 4,  
лит. Д., пом. 4Н. E-mail: balabanovms@mail.ru

**Бабошкина Светлана Вадимовна,**

канд. биол. наук, старший науч. сотр. лаборатории биогеохимии Института  
водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656011, г. Барнаул,  
ул. Молодежная, 1. E-mail: svetlana@iwep.ru

**Хамитов Рустам Нуриманович,**

д-р тех. наук, доцент, профессор кафедры электрической техники Омского  
государственного технического университета, Россия, 644050, г. Омск,  
пр. Мира, 11. E-mail: apple\_27@mail.ru

**Актуальность.** В настоящее время в России создается интеллектуальная энергосистема с активно-адаптивной сетью – ИЭС ААС (за рубежом – Smart Grid). Сложность проектирования элементов архитектуры ИЭС ААС диктует необходимость создания PLM-системы для их реализации, способной прогнозировать улучшение в ходе НИОКР электрических и экологических показателей предприятия.

**Цель работы.** Обсуждение опыта реализации на промышленно опасных объектах элемента ИЭС ААС – более частной САУ НРМ (системы автоматического управления напряжением и реактивной мощностью), базовым кластером которой являются FACTS-устройства. Обоснование необходимости междисциплинарного подхода при решении задач энергосбережения и экологической безопасности.

**Методы.** Имитационное моделирование внедрения FACTS-устройств на промышленные предприятия было выполнено в специализированных ПО: RastrWin (Россия), DigSILENT (Германия), EasyPower (США). Результаты сопоставлялись с известными научными разработками в данной области.

**Результаты.** В ходе обсуждения экономических преимуществ реализации НИОКР по внедрению FACTS-устройств на металлургических предприятиях и возможности параллельного решения экологических проблем производства удалось показать важность и актуальность междисциплинарного подхода при построении архитектуры ИЭС ААС. Доказано, что внедрение FACTS-устройств действительно обеспечивает значительный положительный технико-экономический эффект. Однако экологический эффект от их использования необходимо подтверждать с помощью специальных программ и баз данных, в частности разработанных авторами.

**Выводы.** Авторы полагают, что основой создаваемой в ходе построения в России архитектуры Smart Grid системы САУ НРМ обязательно должен стать процесс интеграции экологических и электросберегающих направлений. В работе показано, что разрабатываемый ООО «МЭК» программно-технический комплекс способен облегчить техническим специалистам решение следующих задач: выполнение комплексного предпроектного обследования (экологического и энергетического аудита); имитационное моделирование энергорайонов; выбор FACTS-устройств и определение их характеристик; оценку совместной работы технологического оборудования предприятия и FACTS-устройств (формирование базы данных). После изготовления и поставки ООО «МЭК» осуществляет удаленный контроль эффективности введенных в эксплуатацию энергосберегающих технологий, мониторинг изменения показателей выбросов и сбросов предприятием, анализ уровня заболеваемости населения.

### **Ключевые слова:**

Экологический аудит, энергоаудит, интеллектуальные энергосистемы с активно-адаптивной сетью, системы автоматического управления напряжением и реактивной мощностью, FACTS-устройства, программно-технический комплекс «МЭК», выбросы, сбросы.

### **Введение**

Богатая трехсотлетняя история промышленности России всемирно известна своими действующими до сих пор гигантами – Адмиралтейские верфи (Санкт-Петербург, 1704 г.), Нижне-Тагильские металлургический и машиностроительный заводы (1725 г.), Выксунский металлургический завод (1757 г.), Ижевский металлургический и оружейный заводы (1760 г.), Путиловский (Кировский) завод (Санкт-Петербург, 1801 г.), Обуховский завод (Санкт-Петербург, 1863 г.) и многие другие. Внедрение в производство научно-тех-

нических открытий в России непосредственно было связано с обострением внешнеполитической ситуации, поэтому строительство новых промышленных объектов в нашей стране, как правило, велось в экстремальных условиях.

Современное промышленное развитие России в период с 1917 г. можно разделить на три крупных этапа: 20–30-е гг. индустриализации – восстановление после Первой мировой и Гражданской войн разрушенных предприятий, строительство промышленных гигантов; 40-е гг. – эвакуация большого количества предприятий и наращивание объемов

продукции военно-промышленного комплекса; 50–60-е гг. – период создания ракетно-ядерного щита страны, с освоением необходимых научно-исследовательских и промышленных мощностей. Указанные этапы отличают отсутствие междисциплинарной проработки проектов и четкой оценки природно-климатических особенностей районов, а также несоблюдение санитарно-гигиенических и градостроительных требований, недоучет метеорологических факторов, отсутствие поиска наилучшей существующей технологии (НСТ). В этот период не прорабатывались вопросы полного использования сырья и утилизации отходов, не учитывались последствия техногенных преобразований среды и многое другое.

Рассматривание окружающей среды в течение десятилетий как площадки для размещения производства или ресурсной базы, эксплуатация которых происходила без учета интересов природы, к 1970-м гг. привела к комплексу экологических проблем: к деградации земельных ресурсов и лесов, загрязнению воздуха, почв, природных поверхностных и подземных вод вредными веществами и, как следствие, к ухудшению здоровья населения [1].

Несмотря на постановления Совета Министров РСФСР и меры, предпринимаемые местными советами народных депутатов в последующий период времени (до 1990-х гг.), существенных положительных изменений в экологической обстановке урбанизированных территорий страны не происходило, т. к. для этого необходимо было пересматривать всю концепцию строительства промышленных и энергорайонов. Следует отметить, что первый научный совет экологического профиля при АН СССР был открыт только в 1964 г., в номенклатуре ВАК специальность «экология» появилась в середине 80-х гг., а Министерство по охране окружающей среды и сеть комитетов во всех субъектах Российской Федерации (в настоящее время – Государственный комитет РФ по охране окружающей среды) впервые созданы в 1988 г., из чего следует, что профессионально вопросы экологической безопасности промышленных объектов в России начали решаться только с 90-х годов [2].

#### Интеллектуализация электроэнергетики

В текущий «кластер»/«волну инноваций» (термин, предложенный Joseph Alois Schumpeter для отрезка времени, отражающего период научно-технического прогресса [3]) в России реализуется этап создания интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). Данные технические системы отличает большое количество датчиков сбора информации и элементов ее обработки, что позволяет вести оценку текущей и прогнозирование будущей ситуации. Особенностью «умной сети» является резервирование структур, позволяющее избегать «узких мест» и опасных неустойчивых режимов работы. Таким образом, ИЭС ААС – это IT-сеть, обеспечивающая:

поток электричества и информации от электростанции до потребителей; контроль и мониторинг; значительно более высокую производительность энергосети (за счет информационных технологий и средств коммуникации); энергию с более высокими показателями качества в режиме экономичной работы сети [4–6].

Практическое воплощение концепции Smart Grid в России в виде ИЭС ААС зависит от технических средств активно-адаптивной сети (в основном FACTS-устройств), обеспечивающих её управляемость и, как следствие, определяющих возможность «интеллектуализации» электроэнергетики [7–9].

В 2014 г. в Евросоюзе вступил в силу «Третий энергопакет» (the Third Energy Package consists of two Directives and three Regulations: Directive 2009/72/EC; Directive 2009/73/EC; Regulation (EC) № 714/2009; Regulation (EC) № 715/2009; Regulation (EC) № 713/2009). Его цель – объединить довольно разобщенный пока энергетический рынок ЕС и сформировать сквозной отраслевой баланс топливно-энергетических ресурсов (электроэнергии, газа, нефтепродуктов, угля и т. п.) с выходом на единый киловатт-час (кВт·ч) или гигакалорию (Гкал). Благодаря такому подходу интеллектуальные технологии в ЕС к 2020 г. должны пройти путь от Smart Metering («умного учета»), Smart Grid («умной сети») к Smart City – «умному городу» [4, 10].

Переход к «умному учету, сети и городу» требует от FACTS-устройств максимального быстродействия, которое обеспечивается силовой электроникой на базе различных модификаций преобразователей напряжения, использующих управляемые полупроводниковые вентили [7–9, 11, 12].

Один из элементов ИЭС ААС в России в настоящее время пытается реализовать монополичный оператор по управлению Единой национальной электрической сетью (ЕНЭС) – ОАО «ФСК ЕЭС». Компанией планируется создание иерархической системы автоматического управления режимом энергосистемы (энергорайонов) по напряжению и реактивной мощности (САУ НРМ). Проект отличает трехуровневая система управления: уровень энергосистемы, уровень энергорайона и уровень энергообъектов (подстанции, электростанции, крупные потребители электроэнергии) [13].

В условиях идущего объединения энергорынков (Россия–СНГ, Россия–Европа, Россия–Азия [14]) вопрос синхронизации и интеграции работы энергосетей как системной инфраструктуры энергетики чрезвычайно важен. Кто и откуда (из России или из-за рубежа) фактически станет управлять режимами энергоснабжения и перетоками электроэнергии в экономике нашей страны, будет зависеть от успешного создания данной инновационной энергосистемы – ИЭС ААС [15].

Зарубежные аналитики – ученики и последователи Н.Д. Кондратьева – сходятся во мнении, что при сохранении нынешних темпов технико-эконо-

мического развития шестой технологический уклад во всем мире начнёт оформляться уже в 2010–2020 гг. Для подобных прогнозов есть основания, т. к. в США доля производительных сил четвертого технологического уклада сейчас составляет 20 %, пятого – 60 % и 5 % уже приходится на шестой. В России более 50 % производительных сил относят лишь к четвертому техноукладу и только 10 % (в авиакосмической промышленности) – к пятому [16].

Как обоснованно считает академик РАН Е.Н. Каблов: «Вхождение России в шестой технологический уклад – не самоцель, а вопрос выживания, развития экономики, обеспечения безопасности и международного статуса страны, достижения высокого уровня благополучия граждан. Чтобы в течение ближайших 10 лет наша страна смогла войти в число государств с высоким уровнем технико-экономического развития, ей надо, образно говоря, перемахнуть через пятый уклад» [16].

Следует отметить, что Правительство РФ принимает определенные шаги для реализации поставленной задачи. Так, «энергоэффективность и ресурсосбережение» вошли в перечень приоритетных направлений модернизации экономики и инновационного развития России, утвержденный Советом при Президенте [17].

Таким образом, построение архитектуры Smart Grid и внедрение FACTS-устройств российской энергетикой является важным направлением решения «Задачи-25» [17] и соответствует поэтапному переходу российской экономики к шестому технологическому укладу, так как энергетика является базовой инфраструктурной отраслью, во многом определяющей эффективность и конкурентоспособность всех остальных отраслей.

Несмотря на то что «Энергетическая стратегия РФ» [18] закрепила в качестве приоритетных задач внедрение FACTS-устройств на промышленных и сетевых объектах, а также построение архитектуры Smart Grid в масштабах страны, ее реализация сдерживается отсутствием специальной современной литературы, в том числе методики выбора конкретного типа и характеристик оборудования. В связи с актуальностью данной темы авторами (М.С. Балабанов, Р.Н. Хамитов) разработана методология выбора FACTS-устройств из всего спектра оборудования по состоянию на 2015 г. (рассмотрены 24 основных типа и подтипы). Методология запатентована [19, 20], а суть ее подробно раскрыта в монографии [21].

#### Энерго-экологические мероприятия

Авторы считают, что с целью скорейшего перехода к шестому техноукладу в России в настоящее время следует изменить концептуальный подход к развитию промышленности и энергетики. Одной из важных задач является выполнение междисциплинарного анализа проектов на первом этапе, в ходе проектно-исследовательских работ, либо совместное выполнение экологических и энергетиче-

ских аудитов на действующих объектах. В настоящее время в научно-технической литературе встречается очень мало работ, освещающих вопросы совместного энерго-экологического аудита. Тем не менее, специалисты-практики обсуждают необходимость реализации данной концепции [22].

Целью настоящего исследования являлось подробное изучение опыта и определение сдерживающих факторов по созданию PLM-системы для построения архитектуры ИЭС ААС.

В настоящее время результаты аудитов (проводимых в соответствии с ФЗ № 28 «Об энергосбережении» и ГОСТ Р ИСО 14031–2001 «Управление окружающей средой») оформляются соответствующими паспортами (потребителя ТЭР – ГОСТ Р 51379–99 и природопользователя – ГОСТ Р 17.0.0.00–2000).

В согласии с другими авторами [22] считаем существенным недостатком нормативно-законодательной базы отсутствие взаимосвязи между уровнем электрических потерь, перерасхода топливно-энергетических ресурсов и уровнем вредных выбросов и сбросов предприятий, которые отдельно отражены в действующих нормативно-технических и руководящих документах (НТД и РД), но никак между собой не увязаны.

Опыт проведения энергетических обследований ООО «МЭК», как промышленных предприятий, так и объектов РАО ЕЭС, показывает, что стремление каждого предприятия самостоятельно решить означенные проблемы в целом снижает эффективность инвестиционных вложений в энерго-экологические мероприятия.

Проанализируем актуальность энерго-экологических мероприятий на примере городов Сибирского федерального округа с различным типом преобладающей экологической нагрузки: от объектов ОАО «РАО «ЕЭС России» (генерирующие устройства – ГУ) и от промышленных предприятий (объекты металлургии и машиностроения).

Так, например, в настоящее время главным стационарным антропогенным источником поступления тяжелых металлов в почвы, растения и другие компоненты экосистем различных зон г. Барнаула (Алтайский край) являются газопылевые выбросы теплоэлектростанций (ТЭЦ).

В 2008 г. учеными из Института водных и экологических проблем СО РАН [23] было установлено, что повышенные концентрации микроэлементов чаще встречались в растениях окрестностей ТЭЦ-2, тогда как растения в районе ТЭЦ-3 отличались меньшими концентрациями элементов, поскольку при ее строительстве использовалось более совершенное оборудование, была смонтирована система золоулавливания, а в 90-е гг. котлы ТЭЦ-3 перевели на более экономичный тип сжигания горючей смеси.

Кроме того, авторы [23] отметили, что виды растений с широкими листовыми пластинками (лопух, а также лебеда), а следовательно, с б?льшими

возможностями для фолиарного поглощения аэрогенно переносимых поллютантов, содержащихся в газопылевых выбросах ТЭЦ, отличались более высокими концентрациями металлов.

На наш взгляд, перспективный экологический проект по сокращению выбросов Барнаульскими ТЭЦ в обязательном порядке должен включать имитационное моделирование электросетей всего энергорайона – от ГУ до потребителей. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) позволят определить индивидуальные характеристики необходимых FACTS-устройств. Исключительно индивидуальные технические решения (а не адаптация серийно выпускаемых образцов) позволяет сокращать сроки окупаемости проектов до минимальных (от 1 месяца до 3-х лет) [24].

Теоретически обосновано и практически доказано, что применение FACTS-устройств обеспечивает статическую устойчивость генераторов, приводит к уменьшению расхода топлива (до 8 %), повышает пропускную способность сетей, сокращает сетевые потери [25].

Если в Барнауле основным источником загрязнений являются ТЭЦ, то для промышленных центров соседней Кемеровской области – Новокузнецка и Юрги – основным очагом распространения поллютантов является ферросплавное производство [26].

В литературе встречаются сведения о загрязнении объектов окружающей среды Кемеровской области тяжелыми металлами, в том числе о превышении нормативов (ПДК и ОДК) содержания валового и подвижного цинка, а также валового содержания свинца (Pb), марганца (Mn) и мышьяка (As) в почвах г. Новокузнецка, особенно в заводском районе [27]. Авторы подчеркивают, что Mn и As накапливаются преимущественно в верхних горизонтах почв, что также свидетельствует об антропогенном источнике их поступления в объекты окружающей среды [27]. В атмосферном воздухе Новокузнецка обнаруживаются повышенные относительно предельно допустимых нормативов концентрации формальдегида, взвешенных частиц, диоксида азота и фтористого водорода. Степень загрязнения атмосферного воздуха г. Новокузнецка оценивается как опасная для здоровья населения. Наибольшей потенциальной угрозой для населения от стационарных источников являются выбросы взвешенных частиц и диоксида серы [26].

С 2010 г. ООО «МЭК», под руководством автора данной статьи, реализовало в данном регионе ряд НИОКР (расчет, изготовление, поставка, наладка FACTS-устройств) для нужд холдинга ОАО «ЧЭМК», в т. ч.: ОСП «Юргинский ферросплавный завод», ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (г. Юрга) – HF (harmonic filter), 15 МВАр, 10 кВ, 4 шт.; ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (г. Новокузнецк) – HF, 10 МВАр, 10 кВ, 16 шт.

Все перечисленные работы были направлены на компенсацию реактивной мощности при нали-

чий высших гармоник, которые вызывают потерю мощности печей и снижают энергоэффективность (надежность) в системе электроснабжения ферросплавных производств.

С целью выбора оптимального FACTS-устройства автором были проанализированы свойства и возможности всех существующих типов FACTS-устройств, а именно: SCB, Automatic capacitor banks, TSC, HF, Automatic harmonic filter, Synchronous compensator, TSR, Shunt reactor, Circuit breaker switched reactors, SVC, SVS, SVG, MCSR, STATCOM, ASC, SSSC, IPFC, TCSC, TCSR, TSSR, TSSC, TCPAR, PST, VFT, TCBR, Thyristor based DC link, STATCOM based DC link, Asynchronized synchronous electromechanical frequency converter, Series-parallel regulation devices, UPFC, Short-circuit currents limiting devices, Current limiting devices, TCVL и прочие нестандартные конфигурации. Далее были выполнены имитационные модели системы электроснабжения предприятия с FACTS-устройствами, вольт-амперная характеристика (ВАХ) которых отвечает особенностям ферросплавного производства. Произведено исследование нормальных и аварийных режимов работы системы электроснабжения ферросплавных производств (в т. ч. и при различных узлах подключения FACTS-устройств). Доказано, что оптимальный тип FACTS-устройства для использования в составе ферросплавных печей – HF. Подробно методология выбора FACTS-устройств для конкретных предприятий (промышленных/энергосетевых) изложена в монографии [21].

Опыт эксплуатации разработанного оборудования в течение последних трех лет привел к заметному улучшению технологического цикла предприятий (стабилизация режимов работы печей, сокращение времени плавок), повышению надежности системы электроснабжения предприятий, снижению потерь мощности и повышению энергоэффективности системы электроснабжения ферросплавных производств, обеспечению требований электроснабжающих организаций по качеству электроэнергии и компенсации реактивной мощности.

Основной показатель эффективности работы ферросплавных печей –  $\text{tg}\phi$  – до внедрения HF составлял в среднем (по 29 печам холдинга «Челябинский электро-металлургический комбинат» («ЧЭМК»)) 0,75. По факту ввода в эксплуатацию HF значение  $\text{tg}\phi$  в среднем по эксплуатируемым комплексам печь+HF составляет 0,1.

Ввод в эксплуатацию HF на Юргинском ферросплавном заводе («ЮФЗ») позволил стабилизировать режимы горения дуги, уменьшить износ футеровки и расход электродов, стабилизировать и поднять напряжение, повысить производительность печей. В проводимых холдингом «ЧЭМК» конкурсах среди ферросплавных печей предприятий Челябинска («ЧЭМК»), Новокузнецка («Кузнецкие ферросплавы» («КФ»)), Юрги («ЮФЗ») печи Юргинского завода в период работы с HF уве-



ренно показывают наилучшие результаты по производительности и расходу электроэнергии на тонну продукции, что является подтверждением положительного результата апробации методологии ООО «МЭК» по внедрению FACTS-устройств и построению САУ НРМ [21].

Однако с введением в эксплуатацию перечисленных высокотехнологичных инженерных решений уменьшение объемной составляющей элементов, загрязняющих атмосферный воздух, невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть, т. к. ни ранее, ни в рамках выполненной модернизации в зоне печного зонта не устанавливались стационарные газоанализаторы и не проводилось сопоставление экологической нагрузки с технологическим процессом [28].

В связи с тем что в настоящее время на ферросплавных предприятиях отсутствуют данные по основным показателям работы печи до ввода FACTS-устройств и по факту работы комплекса печь+FACTS-устройство, было рекомендовано завести с 2014 г. на каждую печь «Таблицы экологического мониторинга» (см. таблицу).

Предполагается, что пункты 1–6 таблицы заполняются на каждую плавку в течение 24 часов. Их количество в течение суток и продолжительность определяются службой главного технолога предприятия в соответствии с планом выпуска продукции.

Необходимо учитывать и заносить во II раздел таблицы показатели содержания в воздухе таких загрязняющих веществ, как марганец, формальдегид, свинец, бенз (а) пирен, (содержание  $\text{мг}/\text{м}^3$  и в % от ПДК), а также Индекс загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА) в городе и на территории предприятия. Замеры выполняются в нескольких точках: у печи, в цехе, на территории предприятия, на выходе из системы воздухоочистки, в границах санитарно-защитной зоны, на территории города. Время замеров и их количество в течение суток должно совпадать с количеством плавков (пункты 1–6).

В III разделе таблицы предлагается учитывать (кроме приведенных максимально разовых, связанных по времени к плавке) показатели среднего содержания  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  за 24 часа, за 7 календарных дней, за месяц, квартал, год (каждый показатель – в отдельной строке таблицы).

В IV раздел таблицы предполагается вносить величины основных показателей электростанции в зависимости от уровня реактивной мощности потребителей. Поэтому фиксация значений расхода топлива и выбросов должна коррелироваться с технологическим процессом предприятия.

Предлагается в разделе V фиксировать показатели метеорологической ситуации (кроме перечисленных в таблице: силу ветра,  $\text{м}/\text{с}$ ; атмосферное давление,  $\text{мм рт. ст.}$ ; влажность, %) как прогнозы на 1 день, 7 дней, и погоду по факту во время плавков.

Раз в год предлагается создавать сводную таблицу, в которую (наряду со средними показателями по выплавке и другими базовыми параметрами, содер-

жанию загрязняющих веществ в выбросах и в воздухе различных зон предприятия и города) будут занесены ведущие показатели общей заболеваемости населения различных возрастных категорий – дети, подростки, взрослые (по годам – данные за соответствующее количество лет до и после модернизации печей), а также (отдельно в каждой строке) онкозаболевания, занимающие ведущие позиции в структуре заболеваний населения злокачественными новообразованиями – рак кожи, молочной железы, рак органов дыхания, органов пищеварения.

Методология ведения базы данных подробно раскрыта в работе авторов [28]. Как правило, в городах с металлургическим производством функционируют несколько предприятий, оказывающих существенную техногенную нагрузку на окружающую среду. При этом в большинстве изученных «Концепций экологической безопасности промышленных городов» никак не отмечена необходимость разграничить принадлежность тех или иных выбросов (их качества и количества) конкретным предприятиям. Логично доработать Концепции введением разграничения реальных уровней экологического воздействия и дифференцировать степень ущерба, оказываемого различными предприятиями на окружающую среду.

Следует отметить еще один недочет большинства Концепций – отсутствие в них требований контроля частиц  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$ , в то время как обновленные рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) по содержанию в воздухе твердых частиц, озона, диоксидов азота и серы были опубликованы еще в 2006 г. Они были разработаны специально для ужесточения контроля за состоянием качества атмосферного воздуха. В этих рекомендациях отмечается, что наиболее значимое негативное влияние на здоровье человека оказывает содержание в атмосферном воздухе твердых взвешенных частиц аэродинамическим диаметром меньше 10  $\text{мкм}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) и меньше 2,5  $\text{мкм}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) (для наглядности, диаметр человеческого волоса равен 50–90  $\text{мкм}$ , что как минимум в 20 раз больше диаметра частицы  $\text{PM}_{2,5}$ ). Последнее учтено Роспотребнадзором при разработке методологии обоснования достаточности размеров санитарно-защитной зоны предприятиями [28].

Таким образом, для предприятий тепло- и электроэнергетики становятся актуальными вопросы, связанные с учетом выбросов мелкодисперсной пыли ( $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$ ) и их нормированием для обоснованного планирования мер по охране атмосферного воздуха и контроля их эффективности.

Фиксация параметров в соответствии с предложенной базой данных [28] позволит:

- построить модель влияния метеорологических условий на индекс загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА) в городе;
- построить модель краткосрочного и долгосрочного прогнозирования превышения ПДК в зависимости от технологического цикла предприятия и метеословий;

**Таблица.** Фрагмент базы данных экологического мониторинга изменения состояния окружающей среды и здоровья населения под влиянием возможных сокращений выбросов (в результате проводимой модернизации) от печей ОАО «ЧЭМК»

**Table.** A fragment of a database of environmental monitoring of environmental change and human health under the impact of the emissions reduction of ChEMC furnaces

№ no.	Параметры Parameters	Печь № ___ /Furnace no. ___							
		Дата/Date							
		Работа без ФКУ Work without HF				Работа с ФКУ Work with HF			
		Марка сплава Alloy brand				Марка сплава Alloy brand			
		ФСХ40 FSH40		ФСХ48 FSH48		ФСХ40 FSH40		ФСХ48 FSH48	
Время Time				Время Time					
I. Технология Technology									
1	Вес закладки, т Weight of filling, t	13,5		12,2					
2	Выдача металла на плавку, т Delivery of metal to be smelted, t	5,1		4,3					
3	Удельное потребление энергии, кВт·ч/т Specific energy consumption, kW·h/t	4861,1		5833,3					
4	Коэффициент использования, о. е. The utilization factor, p. u.	0,9		0,9					
5	Длительность одной плавки, мин The duration of one smelting, min	102		102					
6	Активная мощность печи, МВт The active power of the furnace, MW	14,3		15					
II. Показатели загрязнения воздушной среды Air pollution index									
7	Гидроксibenзол, % ПДК Hydroxybenzene, % MPC	169		169					
8	Взвешенные вещества, % ПДК Suspended solids, % MPC	169		169					
III. Взвешенные вещества Suspended solids									
14	PM10 максимально разовые RM10 maximum single								
20	PM2,5 максимально разовые RM2,5 maximum single								
IV. Электростанция Power plant									
26	Выбросы мазутной золы, т The emission of fuel oil ash, t								
27	Энергоемкость, т у. т./кВт·ч ээ Energy consumption, tons of oil equivalent/kW·h								
V. Метеорологический прогноз и погода по факту Meteorology forecast and the weather									
40	Среднесуточная температура, °С The average daily temperature, °C								
41	Направление ветра, с.; ю.; з.; в. The direction of wind, North; South; West; East								
VI. Ежегодная медицинская статистика Annual medical statistics									
Параметры ведущих мест в структуре заболеваний населения The parameters of the leading places in the structure of diseases									
55	Болезни органов дыхания, % Diseases of the respiratory system, %	53,1							
56	Болезни органов пищеварения, % Diseases of digestive organs, %	6,6							
57	Болезни глаза и его придаточного аппарата, % Diseases of eyes and adnexa, %	4,2							
58	Болезни костно-мышечной системы, % Diseases of musculoskeletal system, %	4,0							

- построить модель влияния использования FACTS-устройств на процесс снижения поступления в атмосферу загрязняющих веществ;
- построить модель зависимости содержания загрязняющих веществ в воздушной среде от генерирующих электростанций, питающих предприятие (уменьшение выработки электроэнергии из-за уменьшения потребления активной энергии при работающих FACTS-устройствах), с технологическим циклом производства (объемом потребления активной энергии);
- построить модель зависимости заболеваемости населения от объемов вредных выбросов и метеорологических условий;
- разработать программный комплекс, позволяющий прогнозировать вредные выбросы;
- разработать методические рекомендации по тарифам на загрязнение атмосферы на базе вновь разработанного ПО;
- утвердить новые тарифы на законодательном уровне;
- внедрить аналогичные мероприятия на прочих предприятиях города;
- откорректировать санитарно-защитные зоны предприятий на основании данных по содержанию в выбросах PM10 и PM2,5.

Авторы считают, что формирование такой базы данных с одновременной разработкой программного комплекса позволит определить тонкую грань экологического эффекта при внедрении электроэкономизирующего оборудования (FACTS-устройств) и построении ИЭС ААС.

#### Целеполагание социально-экономического развития России

Важные векторы развития промышленности России – это модернизация энергетических (до ИЭС ААС) и промышленных объектов (до уровня шестого техноуклада). Как правило, работа на указанных объектах ведется точно (пилотные проекты), без моделирования всего энергорайона (от генерирующих устройств до потребителей) и в разрыве от решения экологических задач. В связи с чем, по мнению специалистов, актуально:

1. Одновременное проведение комплексного энерго-экологического обследования на предприятиях и энергетических объектах [22].
2. Организация постоянного энергетического мониторинга через действующую ежегодную процедуру нормирования удельных расходов топлива и технологических потерь электрической и тепловой энергии [22].
3. Приведение статей топливно-энергетического баланса к экологическим показателям (например, к уровням ПДК или фоновым содержаниям химических элементов в объектах окружающей среды). Алгоритм перевода (идентификации) энергетических и экологических единиц целесообразно реализовать через условные единицы – тонны условного топлива (т у. т.) [22].

4. Управление рисками по инвестированию в экологические и энергосберегающие программы предприятия, с учетом их взаимосвязей.

Еще раз отметим, что эффективное управление и оптимизация режимов в энергосистемах дает самый весомый эффект в энергосбережении. Как правило, для решения данных задач создаются специальные программные продукты (элементы АСУ ТП). В ходе экологического мониторинга и работы по экологической защите среды широко используются специализированные программы.

Заметим, что в настоящее время энергоаудиторы, как правило, не владеют «инструментами» оценки экологической экспертизы, а экологи-аудиторы не выполняют оценку взаимосвязи производственной деятельности предприятия с показателями энергетической эффективности и расчетом энергетических балансов.

Оценка значимости экологических и энергетических аспектов в общей процедуре установления приоритетности реализации эколого-энергетических решений должна реализовываться на базе методологии – управления рисками («методы бережливого производства» / lean production, «метод шести сигм» / six sigma).

Из-за большого массива данных, которые необходимо будет собирать (вносить) и обрабатывать специалистам, становится актуальной разработка специализированного единого ПО (PLM-системы), исключающего «человеческий фактор» в ходе реализации проектов.

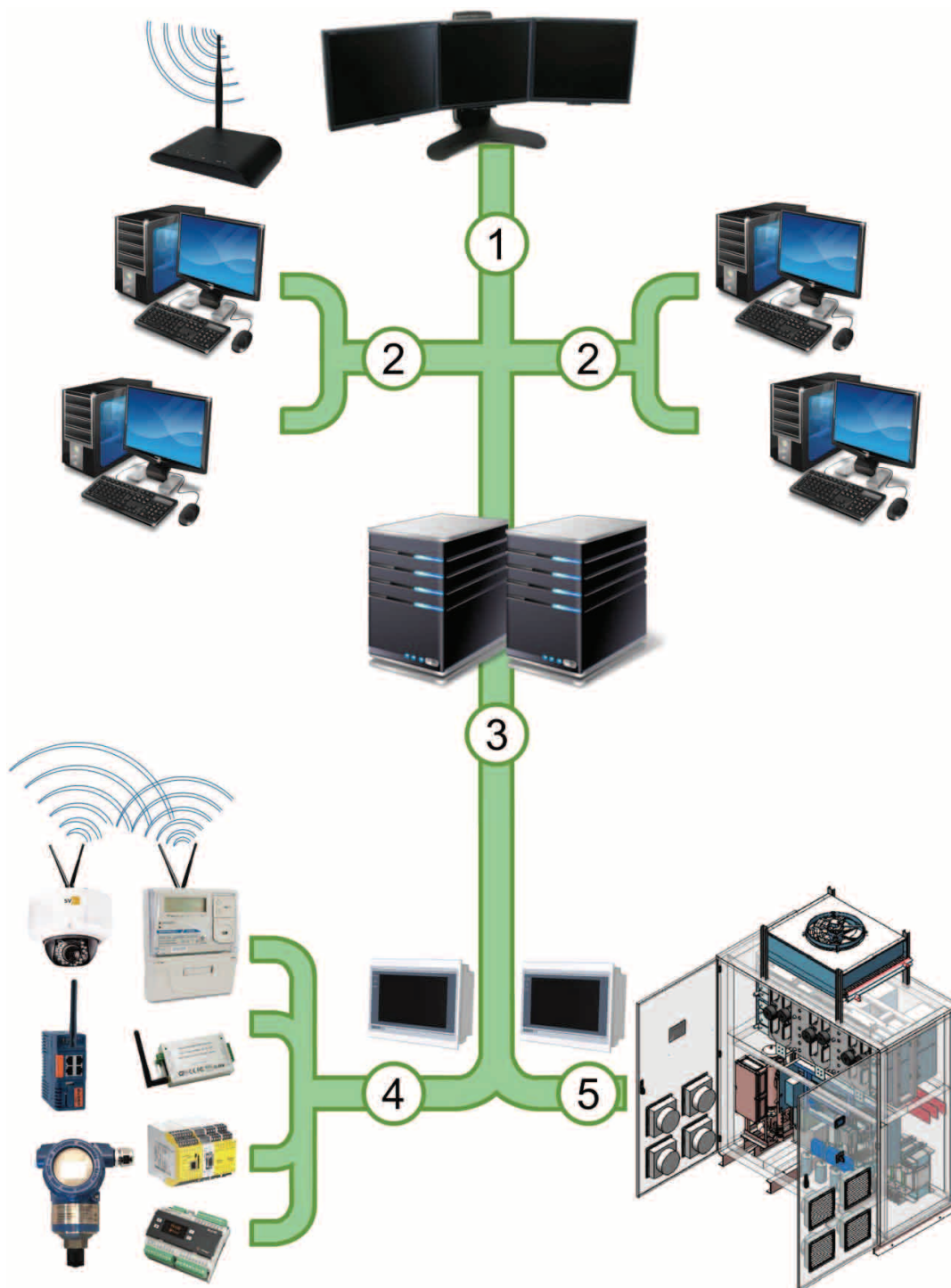
В период технологической сингулярности, в связи с постоянным ростом вычислительных мощностей компьютеров становится возможным и доступным создание сложных моделей, учитывающих географические, климатические, метеорологические, технологические, энергетические, социальные и многие другие особенности объектов. Авторами реализуется работа по созданию программно-технического комплекса «МЭК» (ПТК «МЭК»), сочетающего оценку и решение множества рассмотренных задач, особенно задачи по совместной реализации энерго-экологических мероприятий.

Схематичное изображение работы ПТК «МЭК» представлено на рисунке.

Программно-технический комплекс включает:

1. PLM-систему (в стадии разработки), включающую набор из программных комплексов (как коммерческих специальных программ, так и разрабатываемых силами ООО «МЭК»), позволяющую рассчитывать режимы сети предприятия, тип FACTS-устройств, место их установки, совместимость комплектующих для FACTS-устройства, экологические факторы и определять максимально эффективное решение для конкретного объекта.

ПО ПТК «МЭК» позволяет объединять системы управления дорогостоящим технологическим оборудованием (критичным к качеству электроэнергии) с FACTS-устройствами. Специализированное ПО ПТК обеспечивает синхронизацию рабочих



**Рисунок.** Схема ПТК «МЭК»: 1 – диспетчерская служба; 2 – рабочие места операторов; 3 – сервер; 4 – полевые датчики; 5 – FACTS-устройства

**Figure.** Scheme of «IES» software and hardware: 1 – dispatch service; 2 – operators; 3 – host; 4 – sensors; 5 – FACTS-devices

мест операторов-технологов и операторов-диспетчеров (поз. 2). Базовая информация передается администрации предприятия и на верхний уровень диспетчерской службы энергорайона (поз. 1).

Программа реализует всесторонний анализ данных (электрических, технологических, эколо-

гических и прочих – поз. 3 (сервер)) с управлением в автоматическом и ручном режиме и передачу необходимых данных на верхний уровень «умных сетей».

2. Общее поле датчиков (поз. 4) для оптимизации финансовых затрат заказчика и предотвраще-

- ния дублирования систем (в т. ч. систем технического и коммерческого учета, технологического оборудования и т. д.).
3. Комплекс FACTS-устройств (поз. 5) – оборудование для компенсации реактивной мощности и приведения всех параметров качества электроэнергии к ГОСТу с целью построения в энергорайоне САУ НРМ.
  4. Необходимое сопутствующее оборудование для функционирования ПТК.

В рамках договора гранта № 162ГКС4/8805 от 12.02.2015 г. с ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) ООО «МЭК» реализует инновационный проект «Коммерциализация программно-технического комплекса «МЭК», обеспечивающего интеграцию FACTS-устройств, для построения архитектуры Smart Grid («умные сети») на промышленных предприятиях» по приоритетному направлению развития науки, технологии и техники в Российской Федерации (согласно Указу Президента Российской Федерации от 07.06.2011 № 899) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». В настоящее время ведется работа по защите авторских прав разработчиков инновационного продукта.

#### Обсуждение результатов

Следует отметить, что для успешного и оперативного внедрения совместных энерго-экологических проектов необходимо внесение изменений на законодательном уровне:

1. Энергетический паспорт как итоговый документ энергоаудита должен в обязательном порядке включать, помимо энергетических, экологические показатели функционирования предприятия.
2. Программа энергосбережения, разработанная предприятием в ходе энергообследования, должна учитывать и экологические аспекты с экономической оценкой НСТ.
3. Результаты ежегодного нормирования потерь, удельных расходов ТЭР должны отражаться в соответствующих разделах энергопаспорта и предоставляться специалистам в ходе проведения экологического аудита в совместимом формате через т. у. т.
4. Процедуры ежегодного нормирования удельных расходов и запасов топлива, а также технологических потерь тепловой и электрической энергии должны синтезироваться с процедурами выдачи разрешений на выбросы, сбросы и размещение отходов.

5. Энергоснабжающие организации (подразделения ОАО «РАО «ЕЭС России») в обязательном порядке должны предоставлять исходные данные инжиниринговым компаниям, реализующим НИОКР по реализации САУ НРМ, для моделирования энергорайонов.

#### Выводы

1. Практическое воплощение концепции Smart Grid в России в виде ИЭС ААС зависит от технических средств активно-адаптивной сети (в основном FACTS-устройств), обеспечивающих её управляемость.
2. Ввод в эксплуатацию FACTS-устройств, работающих совместно с металлургическими печами (ЭДСП, РТП, ФСП), позволяет улучшить результаты по производительности на тонну продукции, что является подтверждением положительного результата апробации методологии ООО «МЭК» по внедрению FACTS-устройств и построению САУ НРМ.
3. В промышленных городах необходимо доработать Концепции экологической безопасности введением разграничения реальных уровней экологического воздействия и дифференцировать степень ущерба, оказываемого различными предприятиями на окружающую среду.
4. В настоящее время, время переходного этапа развития промышленности и энергетики в России, особое внимание следует уделять комплексному обследованию промышленно-опасных объектов для успешного и оперативного внедрения совместных энерго-экологических проектов, для чего необходимо внесение изменений на законодательном уровне.
5. Использование наилучших существующих междисциплинарных технологий в ходе модернизации и строительства промышленных/энергетических объектов является одним из наиболее перспективных подходов к защите окружающей среды.
6. Экологическая обстановка в крупных промышленных городах России сегодня является важнейшим аспектом, определяющим их будущее и будущее всей страны. Множество негативных социальных и экономических явлений в промышленных городах определяются именно тем, что они имеют имидж экологически неблагополучных в России. С целью создания благоприятных условий проживания горожан и изменения представлений о промышленных городах необходима доработка Концепций экологической безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмыглёва А.В. Экологические последствия индустриального освоения Кузбасса // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 2 (12). – С. 80–84.
2. Розенберг Г.С., Мозговой Д.П., Гелашвили Д.Б. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2000. – 396 с.
3. Shionoya Y. Schumpeter and his surroundings: on overview // Schumpeter and the Idea of Social Science: A Metatheoretical Study. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 354 p.
4. Ontology matching system for future energy Smart Grids / R. Santodomingo, S. Rohjans, M. Uslar, J.A. Rodríguez-Mondéjar, M.A. Sanz-Bobi // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2014. – V. 32. – P. 242–257.
5. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 2–7.
6. Желонкин А.В., Белявский А.В. Будущее – за интеллектуальными электросетями // Энергетика Татарстана. – 2010. – № 3. – С. 13–21.
7. Idris M.R., Khairuddin A., Mustafa M.W. Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using bees algorithm // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2009. – V. 3. – № 6. – P. 1295–1302.
8. An overview of flexible AC transmission systems / P. Asare, T. Diez, A. Galli, E. O'Neill-Carillo, J. Robertson, R. Zhao // School of Electrical Engineering Purdue University West Lafayette. – 1990. – P. 90. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/eestr/205/> (дата обращения: 17.11.2015).
9. Georgilakis P.S., Vornados P.G. Flexible AC transmission system controllers: an evaluation // Trans. Tech. Publications: Materials Science Forum. – 2011. – V. 670. – P. 399–406.
10. Умный учет – первый шаг к умным сетям: презентация ОАО «ФСК ЕЭС»: доклад (г. Санкт-Петербург, 17.06.2010 г.). URL: [http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution/innovations/Presentation/Doklad\\_Slobodin.pdf](http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution/innovations/Presentation/Doklad_Slobodin.pdf) (дата обращения: 01.11.2015 г.)
11. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ «Энергия», 2010. – 208 с.
12. Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart Grid (основные средства) // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 42–49.
13. Воротицкий В.Э., Рабинович М.А., Каковский С.К. Оптимизация режимов электрических сетей 220–750 кВ по реактивной мощности и напряжению // Энергия единой сети. – 2013. – № 3 (8). – С. 50–59.
14. Новиков С.В. Системы регулирования энергетики России и ЕС: опыт, уроки, эволюция и взаимодействие. URL: [http://www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/6/Novikov\\_rus.pdf](http://www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/6/Novikov_rus.pdf) (дата обращения: 01.11.2015 г.)
15. Иванов Т.В. Курс на Smart Grid. Интеллектуальная электроэнергетика как новый формат геозенергетической суверенности России // Умные измерения. – 2011. – № 2. – С. 6–7.
16. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. – 2010. – № 4. – С. 2–7.
17. Балацкий Е.В., Екимов Н.А. Доктрина высокотехнологичных рабочих мест в российской экономике. – М.: Эдитус, 2013. – 124 с.
18. Об Энергетической стратегии РФ на период до 2030 г.: распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902187046> (дата обращения: 17.11.2015 г.)
19. Балабанов М.С. Определение типа FACTS-устройств: свидетельство РФ № 2014663236; заявл. 31.10.14, опубл. 23.12.14 г. URL: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (дата обращения: 17.11.2015 г.)
20. Балабанов М.С. Определение типа FACTS-устройств V 2.0: свидетельство РФ № 2015617896; заявл. 01.06.15, опубл. 24.07.15 г. URL: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (дата обращения: 17.11.2015 г.)
21. Балабанов М.С., Хамитов Р.Н. FACTS-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 184 с.
22. Завадский В.А., Кошелев А.В. Экологические аспекты в энергосберегающей политике сетевых предприятий // Энергоаудит. – 2007. – № 3. – С. 22–26.
23. Пузанов А.В., Бабошкина С.В. Химический состав почв и растений различных по антропогенной нагрузке территорий г. Барнаула // Мир науки, культуры, образования. – 2008. – № 3. – С. 14–18.
24. Балабанов М.С., Виноградов А.Л. Приведение параметров качества электроэнергии к требованиям ГОСТ в сети АО «Ковдорский ГОК» // Труды международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). Т. I. Электроэнергетика: межвузовский сборник научных трудов. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2015. – С. 144–148.
25. Балабанов М.С., Балабанов Г.С., Ощепков М.Б. Устройства компенсации реактивной мощности в сетях с автономными энергисточниками // Турбины и дизели. – 2012. – № 5 (44). – С. 64–69.
26. Оценка антропогенного загрязнения атмосферного воздуха г. Новокузнецка / П.В. Климов, В.Д. Суржииков, Д.В. Суржииков, В.В. Большаков // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2011. – № 2 (46). – С. 190–194.
27. Подурец О.И. Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове г. Новокузнецка // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. – 2014. – № 5–1. – С. 136–140.
28. Балабанов М.С., Бабошкина С.В. Мероприятия по реализации Концепции экологической безопасности города Челябинска до 2020 года на примере модернизации ферросплавного производства ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» // Экология промышленного производства. – 2014. – № 4 (88) – С. 47–55.

Поступила 18.11.2015.

UDC 621.316.722.076.12; 504.05; 504

## ELECTRIC SAVING AND ENVIRONMENTAL ASPECTS IN POLICY AT THE STAGE OF SMART GRID CREATION IN RUSSIA

**Mikhail S. Balabanov,**

International Energy Saving Corporation LLC, 68, bldg. 4, Pyataya Liniya V.O.  
Street, Saint Petersburg, 199178, Russia. E-mail: balabanovms@mail.ru

**Svetlana V. Baboshkina,**

Institute for Water and Environmental Problems of Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya Street, Barnaul,  
656038, Russia. E-mail: svetlana@iwep.ru

**Rustam N. Khamitov,**

Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.  
E-mail: apple\_27@mail.ru

**Relevance.** Nowadays Russia is creating an intelligence power system with active-adaptive grid (Smart Grid) in. The complexity of the elements design of the Smart Grid architecture calls for the creation of PLM-system for their implementation. This PLM-system is supposed to predict the improvement in the R&D of electrical and environmental performance of the enterprise.

**Objective.** Discussion of the practical experience of the implementation of the Smart Grid element (system of voltage and reactive power automatic control) on the industrial dangerous objects; the FACTS-devices are the basic cluster of this system. The rationale for an interdisciplinary approach in solving problems of energy saving and environmental safety.

**Methods.** Simulation of FACTS-devices implementation at industrial enterprises was performed in specialized software: RastrWin (Russia), DigSILENT (Germany), EasyPower (USA). The results were compared with known scientific developments in this field.

**Results.** During the discussion of the economic benefits of the FACTS-devices implementation at the metallurgical enterprises and the ability at the same time to solve the environmental problems of a factory, the authors found a way to show the importance and relevance of an interdisciplinary approach in constructing the architecture of the Smart Grid. It is proved that the introduction of FACTS-devices does provide a significant positive technical and economic effect. However, the environmental effect of their using should be confirmed by means of special software and databases, in particular, developed by the authors.

**Conclusions.** The authors believe that the integration of environmental and electricity-saving ways has to become the foundation for the system of voltage and reactive power automatic control, as a part of Russian Smart Grid. It is shown that the software and hardware developed by International Energy Saving Corporation LLC help the technicians to solve the following problems: implementation of a comprehensive pre-examination (environmental and energy audits); simulation of power districts; selection of FACTS-devices and their specification determination; assessment of the collaborative work of the technological equipment of the enterprise and FACTS-devices (creation of databases). After manufacture and supply, International Energy Saving Corporation LLC controls the effectiveness of commissioned energy-saving technologies, monitors the changes in emissions and discharges of the enterprise, analyzes the level of morbidity.

### Key words:

Environmental audit, energy audit, Smart Grid, automatic voltage control and reactive power systems, FACTS-devices, software and hardware «International Energy Saving Corporation», emissions, discharges.

### REFERENCES

1. Shmygleva A.V. Ekologicheskie posledstviya industrialnogo osvoeniya Kuzbassa [Ecological consequences of the industrial development of Kuzbass]. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Industrialnogo Universiteta*, 2015, no. 2 (12), pp. 80–84.
2. Rozenberg G.S., Mozgovoy D.P., Gelashvili D.B. *Ekologiya. Elementy teoreticheskikh konstruksiy sovremennoy ekologii* [Ecology. Elements of theoretical constructions of modern ecology]. Samara, Samara Scientific Center of RAS, 2000. 396 p.
3. Shionoya Y. *Shumpeter and his surroundings: on overview*. In: Schumpeter and the Idea of Social Science: A Metatheoretical Study. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 354 p.
4. Santodomingo R., Rohjans S., Uslar M., Rodríguez-Mondéjar J.A., Sanz-Bobi M.A. Ontology matching system for future energy Smart Grids. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, vol. 32, pp. 242–257.
5. Sitnikov V.F., Skopintsev V.A. Intellektualnaya elektroenergeticheskaya sistema s aktivno-adaptivnoy setyu [Intelligent power system with active-adaptive grid (Smart grid)]. *Elektrika*, 2012, no. 3, pp. 2–7.
6. Zhelonkin A.V., Belyavskiy A.V. Budushchee – za intellektualnyimi elektrosyemami [Future is in intellectual electric systems]. *Energetika Tatarstana*, 2010, no. 3, pp. 13–21.
7. Idris M.R., Khairuddin A., Mustafa M.W. Optimal allocation of FACTS devices for ATC enhancement using bees algorithm. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2009, vol. 3, no. 6, pp. 1295–1302.
8. Asare P., Diez T., Galli A., O'Neill-Carillo E., Robertson J., Zhao R. An overview of flexible AC transmission systems. *School of Electrical Engineering Purdue University West Lafayette*, 1990. P. 90. Available at: <http://docs.lib.purdue.edu/ecetr/205/> (accessed 17 November 2015).
9. Georgilakis P.S., Vernados P.G. Flexible AC transmission system controllers: an evaluation. *Trans. Tech. Publications: Materials Science Forum*, 2011, vol. 670, pp. 399–406.
10. *Umnyy uchet – pervyy shag k umnym setyam: prezentatsiya OAO «FSK EES»* [Smart account – the first step towards smart grids. Presentation of JSC «FGC UES»]. Available at: [http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution/innovations/Presentation/Doklad\\_Slobodin.pdf](http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution/innovations/Presentation/Doklad_Slobodin.pdf) (accessed 1 November 2015).

11. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [The innovative development of electric power industry on the basis of the Smart Grid concept]. Moscow, Energiya Publ., 2010. 208 p.
12. Shakaryan Yu.G., Novikov N.L. Tekhnologicheskaya platforma Smart Grid (osnovnye sredstva) [Technology platform Smart Grid (fixed assets)]. *Energoekspert*, 2009, no. 4, pp. 42–49.
13. Vorotnitskiy V.E., Rabinovich M.A., Kakovskiy S.K. Optimizatsiya rezhimov elektricheskikh setey 220–750 kV po reaktivnoy moshchnosti i napryazheniyu [Optimization of electric networks 220–750 kV for reactive power and voltage]. *Energiya edinoy seti*, 2013, no. 3 (8), pp. 50–59.
14. Novikov S.V. *Sistemy regulirovaniya energetiki Rossii i ES: opyt, uroki, evolyutsiya i vzaimodeystvie* [Energy regulation system of Russia and EU: experience, lessons, evolution and interaction]. Available at: [http://www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/6/Novikov\\_rus.pdf](http://www.fstrf.ru/about/activity/inter/meropr/6/Novikov_rus.pdf). (accessed 1 November 2015).
15. Ivanov T.V. Kurs na Smart Grid. Intellekturnaya elektroenergetika kak novyy format geoenergeticheskoy suverennosti Rossii [The course on Smart Grid. Smart electric power industry as a new format geo sovereignty of Russia]. *Umnye izmereniya*, 2011, no. 2, pp. 6–7.
16. Kablov E.N. Shestoy tekhnologicheskii ukhod [Sixth technological structure]. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 4, pp. 2–7.
17. Balatskiy E.V., Ekimov N.A. *Doktrina vysokotekhnologichnykh rabochikh mest v rossiyskoy ekonomike* [The doctrine of high-tech jobs in the Russian economy]. Moscow, Editus Publ., 2013. 124 p.
18. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 13 noyabrya 2009 g. № 1715-r «Ob energeticheskoy strategii RF na period do 2030 g.»* [The order of the Government of the Russian Federation no. 1715-r from 13 November 2009 «On energy strategy of the Russian Federation for the period till 2030»]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902187046> (accessed 17 November 2015).
19. Balabanov M.S. *Opreделение типа FACTS-ustroystv* [The type definition of FACTS devices]. Certif. RF, no. 2014663236, 2014. Available at: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (accessed 17 November 2015).
20. Balabanov M.S. *Opreделение типа FACTS-ustroystv V 2.0* [The type definition of FACTS devices V 2.0]. Certif. RF, no. 20156178966, 2015. Available at: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (accessed 17 November 2015).
21. Balabanov M.S., Khamitov R.N. *FACTS-ustroystva. Vybora pri proektirovani elektrooborudovaniya predpriyatii* [Selecting of FACTS-devices in the electrical equipment design of the industrial enterprises]. Omsk, OmGTU Publ. house, 2015. 184 p.
22. Zavadskiy V.A., Koshelev A.V. *Ekologicheskie aspekty v energosberegayushchey politike setevykh predpriyatii* [Environmental aspects of energy saving policy of the network enterprises]. *Energoaudit*, 2007, no. 3, pp. 22–26.
23. Puzanov A.V., Baboshkina S.V. *Khimicheskiy sostav pochvy i rasteniy razlichnykh po antropogennoy nagruzke territoriy g. Barnaula* [Chemical composition of soils and plants of the Barnaul city territories characterized by different anthropogenic load]. *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*, 2008, no. 3, pp. 14–18.
24. Balabanov M.S., Vinogradov A.L. *Privedenie parametrov kachestva elektroenergii k trebovaniyam GOST v seti AO «Kovdorskiy GOK»* [Coordination of the power supply quality to the requirements of State Standard in network of «Kovdor GOK»]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii»* [Proc. of Int. Conf. Development of electro and heat technology]. Ivanovo, IGEHU Press, 2015, pp. 144–148.
25. Balabanov M.S., Balabanov G.S., Oshchepkov M.B. *Ustroystva kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v setyakh s avtonomnymi energoistochnikami* [Reactive power compensation in networks with autonomous energy sources]. *Turbiny i dizeli*, 2012, no. 5 (44), pp. 64–69.
26. Klimov P.V., Surzhikov V.D., Surzhikov D.V., Bolshakov V.V. *Otsenka antropogennogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukh g. Novokuznetska* [Evaluation of anthropogenic air pollution in Novokuznetsk]. *Vestnik Kemerovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2011, no. 2 (46), pp. 190–194.
27. Podurets O.I. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvennom pokrove g. Novokuznetska* [The content of heavy metals in the soil cover in Novokuznetsk]. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki*, 2014, no. 5–1, pp. 136–140.
28. Balabanov M.S., Baboshkina S.V. *Meropriyatiya po realizatsii Kontseptsii ekologicheskoy bezopasnosti goroda Chelyabinska do 2020 goda na primere modernizatsii ferrosplavnogo proizvodstva OAO «Chelyabinskiy elektrometallurgicheskiy kombinat»* [Activities on realization of the ecological safety Concept of Chelyabinsk city until 2020 on example of modernization of ferroalloy production «Chelyabinsk electrometallurgical industrial complex»]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2014, no. 4 (88), pp. 47–55.

Received: 18 November 2015.



## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ( $U_{пр.}$ ,  $\Phi_i$ , но  $Al_2O_3$ ,  $\cos\alpha_i$ , max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

**Ключевые слова:** (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

**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 23.11.2015. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 17,91. Уч.-изд. л. 16,20.  
Заказ 485-15. 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)