

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



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 326, № 5, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. 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)
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Турция)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс по каталогу агентства
«Роспечать» – 18054

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

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

- 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 «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Volume 326, № 5, 2015

TPU  PUBLISHING
Tomsk

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board

Dyachenko A.N., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, 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)

AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University. The journal was founded in 1903.

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

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

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

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University" 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.

TPU Bulletin 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.

The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М.	6	Rationale for feasibility of using ore tailings for manufacturing hardening mixtures Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M.	6
Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И.	15	Role of structural factors in improving corrosion resistance of pipe steel under cyclic heat treatment Pomazova A.V., Panova T.V., Gering G.I.	15
Экспериментальное исследование спектров изменения температуры при горении некоторых горючих материалов с помощью ИК-диагностики в узких спектральных интервалах Агафонцев М.В., Лобода Е.Л., Рейно В.В.	22	Experimental studies of changes in temperature during combustion of some combustible materials using the method of IR-diagnostics in short spectral bands Agafontsev M.V., Loboda E.L., Reyno V.V.	22
Управление процессом осаждения конденсируемой фазы с использованием электрического поля Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б.	28	Control of condensed phase sedimentation using the electric field Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B.	28
Кинематическое исследование пространственного четырехзвенного неассурированного механизма Яскевич О.М., Дворников Л.Т.	38	Kinematic research of spatial four-link not assuring mechanism Yaskevich O.M., Dvornikov L.T.	38
Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев Массель Л.В., Гальперов В.И.	45	Development of multi-agent systems for distributed solutions of energy problems using agent-based scenarios Massel L.V., Galperov V.I.	45
Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с пружинным накопителем Мошкин В.И.	54	Energy and dynamic efficiency of single-winding linear electromagnetic motors with a spring drive Moshkin V.I.	54
Эколого-геохимические исследования природных сред района Бакcharского железорудного месторождения (Томская область) Шайхиев И.Р., Рихванов Л.П.	62	Ecological and geochemical research of natural environment in Bakchar iron-ore deposit area (Tomsk region) Shaykhiev I.R., Rikhvanov L.P.	62
Численная реализация комплексного метода расчета на примере проточной части турбины турбокомпрессора ТКР-11 Пассар А.В., Тимошенко Д.В.	79	Numerical implementation of the complex calculation method on the example of the turbine flowing part in TKR-11 turbocharger Passar A.V., Timoshenko D.V.	79
Содержание тяжелых металлов в донных отложениях реки Енисей в районе Красноярск Деметьев Д.В., Болсуновский А.А., Борисов Р.В., Трофимова Е.А.	91	Concentrations of heavy metals in bottom sediments of the Yenisei river near Krasnoyarsk Dementyev D.V., Bolsunovsky A.A., Borisov R.V., Trofimova E.A.	91
Исследование кристаллизации леонита из сульфатных калийно-магниевых щелоков Стефанцова О.Г., Рупчева В.А., Поилов В.З.	99	Study of leonite crystallization from sulphate potassium-magnesium liquor Stefantsova O.G., Rupcheva V.A., Poilov V.Z.	99
Объемное геохимическое моделирование золоторудных объектов на примере месторождения Чертово корыто (Патомское нагорье) Гаврилов Р.Ю.	107	Volumetric geochemical modeling of gold objects on the example of deposit Chertovo koryto (Patom upland) Gavrilov R.Y.	107
К задаче контроля частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС Толстикова А.С., Ханькова Е.А.	114	On the issue of controlling the time-frequency parameters of GLONASS navigation field Tolstikova A.S., Khanykova E.A.	114
Мобильная визуализация данных об электромагнитном излучении беспроводных сетей Самойленко Б.И., Вичугов В.Н., Вичугова А.А.	121	Mobile visualization of data on wireless network electromagnetic radiation Samoylenko B.I., Vichugov V.N., Vichugova A.A.	121
Вольтамперная характеристика InGaTe_2 Годжаев Э.М., Абдурахманова У.С., Кулиева С.О.	131	Current-voltage characteristic of InGaTe_2 Godzhayev E.M., Abdurahmanova U.S., Gulieva S.O.	131

УДК 504.55.054:622(470.6)

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

Голик Владимир Иванович,

д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии разработки месторождений
Северо-Кавказского государственного технологического университета,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44. E-mail: v.i.golik@mail.ru

Лукьянов Виктор Григорьевич,

д-р техн. наук, проф., проф.-консультант кафедры транспорта и хранения
нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: v.i.golik@mail.ru

Хашева Зарема Муратовна,

д-р экон. наук, профессор кафедры Института, Россия, 350040,
г. Краснодар, ул. Ставропольская, 216. E-mail: zarema_muratovna@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью изыскания доступного и дешевого сырья для изготовления твердеющих смесей как средства неразрушающего управления состоянием массива при переходе на подземный способ разработки месторождений.

Цель работы: обоснование технической возможности и экономической целесообразности извлечения металлов и солей из хвостов переработки руд как условия их безотходной утилизации в качестве твердеющих смесей и других товаров.

Методы исследования: лабораторные исследования в дезинтеграторной установке ДЕЗ-11, включающие: исследование хвостов, выщелачивание металлов реагентами в перколяторах, комбинированное выщелачивание металлов реагентами в дезинтеграторе, математическое моделирование эколого-экономических исследований, моделирование параметров механохимической активации и статистическую обработку данных на основе множественного регрессионного и корреляционного анализа.

Результаты. Приведена историческая справка об использовании дезинтеграторов в горном деле. Выявлены новые закономерности извлечения металлов из хвостов цветной и черной металлургии и углеобогащения в зависимости от переменных параметров процесса. Доказано, что метод механоактивации позволяет извлечь металлы из хвостов до уровня санитарных требований, что позволит использовать вторичные хвосты для приготовления бетонной продукции без ограничений. Произведена технико-экономическая оценка рекомендуемой механохимической технологии с разработкой интегральной эколого-экономико-математической модели процесса и расчетом экономического эффекта вовлечения некондиционного минерального сырья в производство.

Выводы. Установлены количественные параметры извлечения металлов из хвостов цветной и черной металлургии и углеобогащения в зависимости от параметров механохимической активации. Доказана возможность извлечения металлов из хвостов методом механохимической активации в дезинтеграторе до уровня санитарных требований. Предложена эколого-экономико-математическая модель для оценки эффективности вовлечения некондиционного минерального сырья в производство. Сформулирована концепция безотходной переработки некондиционного минерального сырья, включающая экономические и экологические аспекты.

Ключевые слова:

Месторождение, минеральное сырье, металлы, хвосты обогащения, дезинтегратор, активация, механическая энергия, механохимия, экономика, экология, подземный способ, твердеющая смесь, добыча.

Введение

Добыча минерального сырья характеризуется увеличением объемов и ореола развития добычных работ, обусловленным динамичным развитием потребностей человеческого сообщества. Она давно вышла в лидеры природоразрушающих технологий, прежде всего, из-за нарушения земной поверхности в регионах добычи минерального сырья. Радикальное повреждение литосферы сопровождается деградацией всех сфер окружающей среды.

Поэтому главной целью управления состоянием массива горных пород должно быть сохранение земной поверхности от разрушения. Управление горным давлением сводится к обеспечению оптимальных параметров элементов системы «естественные

массивы – искусственные массивы – поверхность» по критерию сохранности земной поверхности [1–3].

Распространенным критерием эффективности управления состоянием массива горных пород является себестоимость связанных с этим работ или приведенные затраты на 1 м³ погашенных пустот. По этому критерию наиболее предпочтительно обрушение руд и пород с повышенными потерями сырья, разубоживанием и изменением экологического равновесия на участке земной коры. При оценке эффективности этого способа возможна систематическая ошибка, поскольку действительная стоимость земель, минерального сырья и изменения экологической обстановки пока еще не может быть выражена в материальном измерении.

Е.А. Котенко, В.В. Куликовым, Н.В. Демин, В.И. Голиком и др. предложен критерий оптимальности в виде условия сохранения земной поверхности от разрушения. Указанный критерий вводится при технико-экономическом сравнении технологий по конечной стоимости продукта [4, 5].

Благодаря критерию сохранности земной поверхности способы управления массивом становятся в сравнимые условия, отвечая концепции гуманного подхода к использованию недр и земли. Критерий исключает из числа возможных способы управления состоянием рудовмещающего массива с обрушением пород до выхода горных выработок на земную поверхность, породившие экологические проблемы в районах КМА, Донбасса, Урала и других горнодобывающих областей России и Зарубежья.

Для управления горным давлением используется свойство дискретных массивов создавать устойчивые конструкции за счет энергии разрушения пород. Несущая способность нарушенных пород корректируется технологией разработки путем назначения безопасных параметров очистных выработок.

Крепь участвует в процессе формирования волевок выработок устойчивых зон мощностью, равной первым метрам.

Нарушенные породы не теряют устойчивости, если не превышен предельный пролет (Г.Н. Кузнецов, В.Д. Слесарев, С.В. Ветров и др.) [6]. Условием существования породной конструкции является самозаклинивание пород в примыкающем к нетронутому массиву слое. Условия для использования остаточной несущей способности создаются всегда, но этот феномен не всегда используется, что ведет к разубоживанию руд и потерям металлов.

Усиление жесткости породной конструкции осуществляется инъектированием в пространство между породными кусками связующих материалов, креплением и ограничением пролетов выработок. Но радикальным способом управления массивом является создание искусственных массивов из твердеющих смесей.

Поскольку закладка пустот твердеющими смесями отличается повышенными затратами, проблемой становится обоснование возможности использования дешевых смесей с малой несущей способностью при определенных условиях.

В практике управление геомеханической сбалансированностью массива с сохранением земной поверхности обеспечивается разделением массивов на участки, для которых удовлетворяются условия [7]:

$$L_{\phi} < L_{\text{пред}} \text{ и } H > h_r,$$

где H , h_r – глубина работ от поверхности и высота зоны влияния выработок, м; L_{ϕ} , $L_{\text{пред}}$ – соответственно, пролеты фактические, предельные по условию образования свода естественного равновесия и сохранения плоской кровли; H – глубина расположения рудного тела; h_r – высота зоны влияния горных работ (рис. 1).

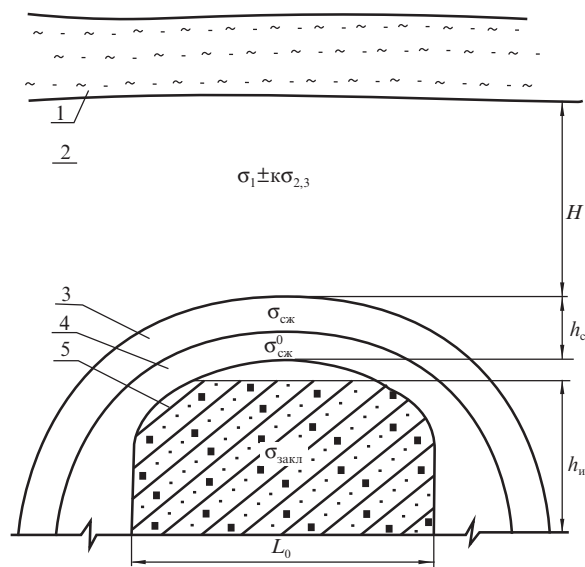


Рис. 1. Схема напряжений в геомеханической системе: 1 – наносы; 2 – горные породы; 3, 4 – соответственно, верхний и нижний слои нарушенных горных пород; 5 – искусственный массив из твердеющей смеси; H – глубина работ; h_c – высота свода естественного равновесия; h_n – высота искусственного массива; σ_1 – вертикальные напряжения в массиве; $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжения в верхних слоях свода естественного равновесия; $\sigma_{\text{сж}}^0$ – напряжения в нижнем слое свода естественного равновесия; $\sigma_{\text{закл}}$ – напряжения в искусственном массиве; L_0 – ширина выработки

Fig. 1. Diagram of stresses in geomechanical system: 1 are the sediments; 2 are the rocks; 3, 4 are the upper and lower layers of dislocated rocks respectively; 5 is the artificial mass of hardening mixture; H is the depth of mining; h_c is the height of natural arch; h_n is the height of artificial mass; σ_1 is the vertical intensity in mass; $\sigma_{\text{сж}}$ is the stress in upper layers of the natural arch; $\sigma_{\text{сж}}^0$ is the stress in lower layers of the natural arch; $\sigma_{\text{закл}}$ is the stress in artificial mass; L_0 – heading width

Участки разделяются на пролеты с устойчивой плоской кровлей. Обеспечение устойчивости массива сводится к назначению параметров технологии, при которых напряжения в элементах системы не превышают критических. Эта задача решается раскройкой месторождения на геомеханически сбалансированные участки с помощью целиков: рудных или из твердеющей закладки. Надежность конструкции проверяется на возможность обрушения налегающих пород до поверхности построением зон влияния выработок (рис. 2).

В пределах геомеханически сбалансированных участков могут быть применены минимизированные по затратам труда и материалов составы твердеющих смесей пониженной прочности. Такой подход позволяет использовать для управления состоянием массива и земной поверхности над ним твердеющие смеси, изготовленные на основе материалов с пониженной активностью компонентов, чаще всего хвостов переработки руд [8, 9].

Накопление отходов добычи и переработки минерального сырья сопровождается химическим воздействием на среду токсичными компонентами

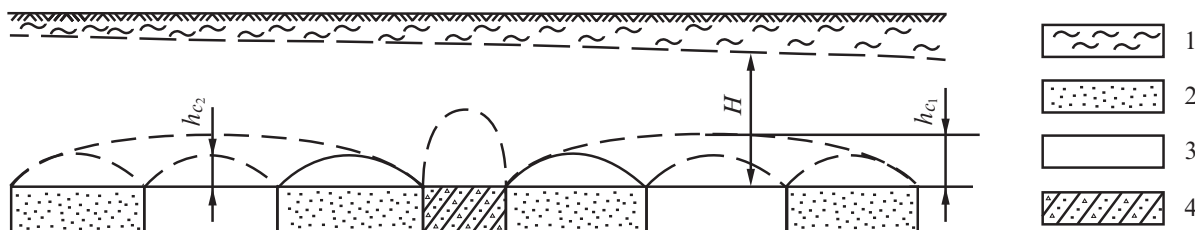


Рис. 2. Схема раскройки месторождения на геомеханически сбалансированные участки: 1 – наносы; 2 – малопрочная закладочная смесь; 3 – выработка; 4 – прочная закладочная смесь; H – расстояние от выработки до земной поверхности; h_1 – высота слоя смещающихся в выработку пород; h_2 – высота слоя смещающихся в выработку пород после заполнения закладочной смесью

Fig. 2. Diagram of field layout to geomechanically balanced regions: 1 are the sediments; 2 is the weak stowing mixture; 3 is the working; 4 is the hard stowing mixture; H is the distance from the working to the earth surface; h_1 is the height of the layer of rocks moving to the working; h_2 is the height of the layer of rocks moving to the working after filling with stowing mixture

отходов, среди которых наиболее опасны тяжелые металлы.

Комбинирование традиционных методов обогащения лишь в редких случаях позволяет утилизировать хвосты. Радикальной мерой снижения глобальной опасности химического загрязнения окружающей среды является только полная утилизация опасного и, вместе с тем, ценного сырья.

Природоохранная концепция обращения с отходами переработки минерального сырья исходит из того, что оно является неиспользуемым и опасным при хранении ресурсом, использование которого может обеспечить эколого-экономический эффект [10–12].

Применяемые методы добычи и переработки руд характеризуются потерей части ценных компонентов в хвостах на всех переделах (рис. 3).

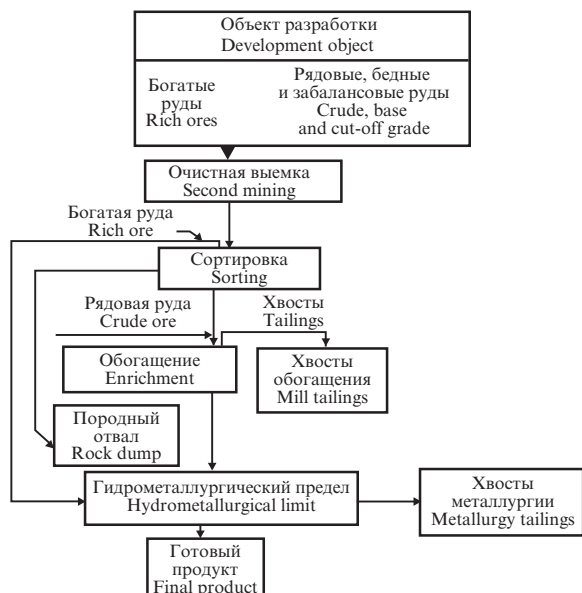


Рис. 3. Принципиальная схема добычи и переработки металлов

Fig. 3. Functional diagram of metal mining and processing

Так, комбинирование методов магнитного, гравитационного и электрохимического обогащения

позволяет выделять из богатых хвостов обогащения полиметаллических руд в селективные товарные продукты железа, марганец, титан, серу и другие компоненты.

Следующим этапом развития технологий обогащения является использование для извлечения металлов второго вида энергии – химической. В ходе химического выщелачивания металлы извлекаются из хвостов обогащения в растворы, а из них – в товарные осадки. Так выщелачивают золото из отходов обогатительного производства с содержанием 0,6–0,3 г/т, недоступным для традиционных технологий, медь и уран.

В ходе сорбционного выщелачивания извлекаемые из хвостов обогащения металлы осаждаются на ионообменную смолу, с которой снимаются в процессе десорбции (рис. 4).

Извлечение из жидкой фазы пульпы увеличивается в противотоке пульпа–смола наложением электрического поля.

Принципиально новая технология эксплуатирует ранее неизвестный феномен активации вещества большой механической энергией при скорости обработки более 250 м/с [13–15].

Под механической активацией понимают повышение каталитических свойств веществ при измельчении, ускорение химических реакций, повышение прочности. Эффект механической активации проявляется в дезинтеграторах (рис. 5).

Материал подается в центральную часть рабочего органа и подвергается многократным ударам бил на дисках, вращающихся со скоростью 1000 об/мин во встречных направлениях. За счет перегрузки в нем накапливается энергия особого вида и происходит структурное изменение его состояния. Скорость удара в дезинтеграторе на порядок больше, чем в вибрационных и шаровых мельницах, а ускорение достигает миллионов ускорений свободного падения.

Активация создает в материале электрически неравномерно заряженные центры, а по границам скоплений примесей происходит разрушение материала, поэтому процессы сепарирования фаз активизируются, а выход целевого продукта увеличивается.

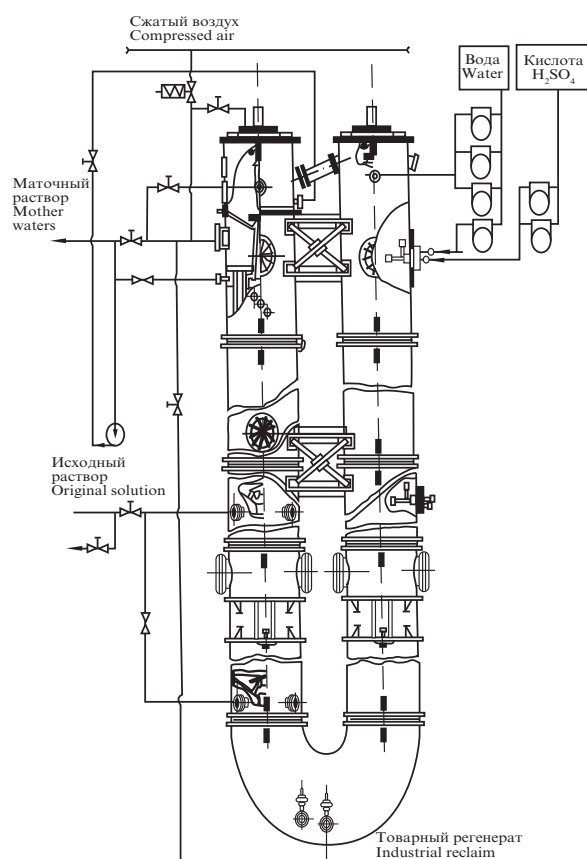


Рис. 4. Сорбционно-десорбционная колонна с противотоком пульпа-смола

Fig. 4. Sorption-desorption column with counter-flow pulp-resin

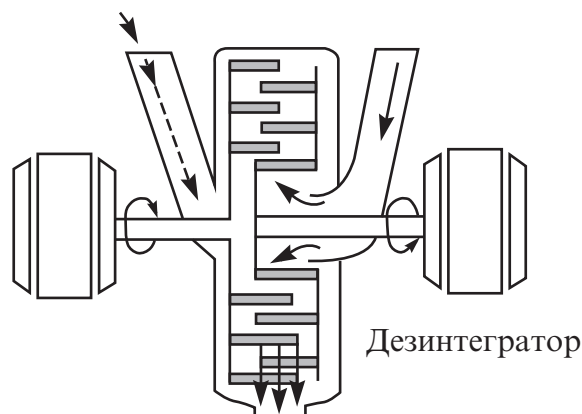


Рис. 5. Схема дезинтегратора

Fig. 5. Scheme of disintegrator

Результаты и обсуждение эксперимента

Использование дезинтегратора в горной практике впервые в мире осуществлено на месторождении «Шокпак» в Северном Казахстане в составе закладочного комплекса. Установка ДУ-65, укомплектованная универсальными ступицами, четырех- и трехрядными роторами и двигателями мощностью 200–250 кВт, обеспечивала выход активно-

го класса до 55 %, а в комбинации с вибрационной мельницей – до 70 %, что позволяло активированному шлаку конкурировать с товарным цементом.

Установка располагалась в отдельном здании с площадью основания 5–7 м в трех уровнях. Материал доставляли на верхнюю отметку и пропускали сквозь сито с отверстиями 20 мм в установку. Из дезинтегратора продукты измельчения поступали в бункер-успокоитель и направлялись в технологическую цепь. При мокрой схеме активации в дезинтегратор подавали воду.

Проблемой использования хвостов обогащения является наличие неизвлеченных металлов. Как правило, из руд извлекаются титановые металлы, а сопутствующие остаются, затрудняя дальнейшее использование хвостов. Суммарная стоимость неизвлеченных их хвостов и теряемых в закладочных смесях металлов может превосходить стоимость извлеченных.

Механохимическая технология позволяет одновременно с повышением активности компонентов смесей извлекать и металлы.

Экспериментальное обоснование этого феномена осуществлено на хвостах обогащения цветных и черных металлов и углей. Применена единая методика выщелачивания в режимах:

1. Агитационное выщелачивание необработанных хвостов.
2. Агитационное выщелачивание предварительно активированных хвостов.
3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.
4. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе хвостов.
5. Многократное выщелачивание хвостов в дезинтеграторе.

Эксперименты осуществлены с использованием математического планирования по плану Венкена–Бокса. Независимыми факторами являлись:

- содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе (X_1) 2–10 г/л;
- содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе (X_2) 20–160 г/л;
- соотношение массы выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы (X_3) в единичном эксперименте (50 г) 4–10 раз;
- время выщелачивания (X_4) в пределах 0,15–1,0 ч.

Полиметаллические руды Садонских месторождений (Россия, Северный Кавказ) обогащают в тяжелых суспензиях с извлечением свинца и цинка 80–85 %, серебра – 60 %, кадмия – 56 %, висмута – 30 % и выходом хвостов 25–50 % от объема перерабатываемых руд. Химический состав хвостов, %: SiO_2 – 31,4; Fe – 4,4; CaO – 1,96; S – 1,88; Ag – 0,015; Cu – 0,18; Mn – 0,015; K_2O – 3,5; Al_2O_3 – 0,8; TiO_2 – 0,03; Zn – 0,95; Pb – 0,84.

Извлечение металлов в раствор характеризуется табл. 1 [9].

Результаты исследования позволяют сделать выводы:

- активация в дезинтеграторе с выщелачиванием вне его увеличивает извлечение из хвостов обо-

гащения: по свинцу – в 1,4 раза, по цинку – в 1,1 раза;

- выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом раздельной активации и выщелачивания обеспечивает примерно одинаковое извлечение, но сокращает продолжительность процесса с 15–60 минут до секунд, т. е. на 2 порядка.

Таблица 1. Результаты извлечения цветных металлов в раствор

Table 1. Results of extracting nonferrous metals into solution

Серии/Series	Свинец, %/Lead, %	Цинк, %/Zink, %
1	24,8	39,2
2	33,9	44,4
3	35,7	46,1
4	13,2	10,3
5	21,5	21,6
6	21,6	21,9

Результаты эксперимента позволяют утверждать:

- выщелачивание пульпы хвостов или руды с активацией в дезинтеграторе существенно эффективнее, чем агитационное выщелачивание;
- в порядке убывания степени влияния на процесс следуют: содержание в выщелачивающем растворе реагента, частота вращения роторов дезинтегратора, число циклов переработки в дезинтеграторе и соотношение Ж: Т.

Курская Магнитная аномалия [16]. Хвосты обогащения мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов представляют собой мелкодисперсный минеральный порошок с содержанием фракции крупностью менее 0,071 мм 40–70 %.

Химический состав хвостов, %: SiO₂ – 64, Fe – 8, Al₂O₃ – 5,2, Mn – 3,2, K₂O – 0,7, P – 0,1, Ca – 0,8, MgO – 0,2, Cu – 5·10⁻³, Ni – 4·10⁻³, Zn – 5·10⁻⁴, As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y – на уровне (30–50)·10⁻⁵.

При исходном содержании железа в исследуемой пробе 8 % однократным выщелачиванием извлекается примерно 1 % железа, а после трехкратного пропускания хвостов через дезинтегратор в раствор – 3 % железа. Путем дальнейшего увеличения циклов переработки можно достичь безопасного по санитарным условиям уровня содержания железа.

Химический состав исходной пробы хвостов характеризуется содержанием As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y на уровне (30–50)·10⁻⁶ %. После механохимической обработки содержание во вторичных хвостах не превышает допустимых для строительных материалов значений.

Механохимическая активация при однократной обработке увеличивает извлечение металлов в раствор по сравнению с базовым значением на величину до 25 % и обладает резервом повышения при увеличении циклов переработки.

Переработка в течение одинакового времени характеризуется табл. 2.

Таблица 2. Результаты выщелачивания металлов

Table 2. Results of metal leaching

Вид выщелачивания Type of leaching	Остаток в хвостах, % Remains in tailings, %					
	Al ₂ O ₃	Mn	K ₂ O	P	Ca	MgO
Агитационное Agitation	4,9	2,8	0,3	0,07	0,25	0,16
Активированных хвостов Activated tailings	4,2	2,5	0,2	0,07	0,23	0,14
В дезинтеграторе In disintegrator	3,7	2,3	0,2	0,06	0,20	0,11
Множественная механохимическая активация Multiple mechanochemical activation	3,5	2,2	0,2	0,07	0,18	0,11

Максимальное извлечение достигается при механохимической активации хвостов и зависит от продолжительности процессов. Увеличивая продолжительность процесса, можно извлекать целевые компоненты до фонового содержания.

После извлечения металлов до уровня санитарных требований отходы обогащения пригодны для изготовления закладочных смесей и бетонной товарной продукции, обеспечивая необходимую марку при минимальном расходе цементного вяжущего.

Активация в дезинтеграторе без выщелачивания увеличивает прочность смеси с добавкой цемента с 1,30 до 1, 52 МПа или на величину коэффициента 1,17.

Активированные в дезинтеграторе смеси без добавления цемента могут быть использованы для закладки подавляющего объема очистных выработок.

Российский Донбасс [17]. Содержание металлов в хвостах обогащения угля характеризуется табл. 3.

Таблица 3. Содержание металлов в хвостах обогащения угля, г/т

Table 3. Metal content in coal saturation tailings, g/t

Элемент Element	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднее Average
Марганец/Manganese	310	330	320
Никель/Nickel	10	40	25
Кобальт/Cobalt	5	10	5
Ванадий/Vanadium	60	130	95
Хром/Chrome	50	140	85
Молибден/Molybdenum	1	2	1.5
Цирконий/Zirconium	60	90	75
Свинец/Lead	20	90	55
Цинк/Zink	10	40	50
Бериллий/Beryllium	2	2,6	2,3

Результаты анализа сокращенных проб для горелых и негорелых хвостов обогащения приведены в табл. 4, 5.

Извлечение в выпаренный и прокаленный продукт составило, %: кобальта – 104,5; никеля –

102,1; свинца – 43,5; цинка – 36,6; хрома – 18,0; марганца – 1,4. При очень малом начальном содержании металлов в хвостах извлечение их в раствор оказалось достаточно высоким мг/л: марганец – 1, никель – 7, кобальт – 2, хром – 4, свинец – 3, цинк – 5.

Таблица 4. Извлечение металлов из горелых отходов обогащения угля

Table 4. Metal extraction from burnt wastes of coal saturation

Металл, % Metal, %	Упаренный концентрат Evaporated concentrate	Сухой концентрат Dry concentrate	Изменение, раз Change, times
Cr	0,01	0,10	10
Fe	0,85	2,75	3
Ni	0,03	0,30	10
Mn	0,01	0,10	10
Co	0,02	0,10	5
Cu	0,03	0,40	13
Pb	0,01	0,1	10
Zn	0,04	0,30	7

Таблица 5. Извлечение металлов из негорелых отходов обогащения угля

Table 5. Metal extraction from unburnt wastes of coal saturation

Металл, % Metal, %	Упаренный концентрат Evaporated concentrate	Сухой концентрат Dry concentrate	Изменение, раз Change, times
Cr	0,03	0,15	5
Fe	1,3	3,06	2
Ni	0,026	0,17	6
Mn	0,015	0,10	8
Co	0,03	0,12	4
Cu	0,03	0,30	10
Pb	0,01	0,10	10
Zn	0,02	0,14	7

Хвосты механохимической активации отходов обогащения угля представляют собой дисперсную массу, сложенную частицами размерами около 0,1 мм, которая отличается более равномерной структурой, что существенно повышает их строительные качества [18]. Это иллюстрируется разницей прочности бетона, изготовленного на основе шлака, просто размолотого в мельнице и активированного в дезинтеграторе при прочих равных условиях.

Использование хвостов обогащения приносит доход, величина которого может быть описана моделью:

$$\dot{I} = \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N \{M_{ey} \cdot \ddot{O}_{i\dot{o}} + Q_y \cdot \ddot{O}_{qy}\} - \sum_{c=1}^C [K(i + E_{i\dot{o}}) + E_q + E_x] - [M_e \cdot \ddot{O}_i + Q\ddot{O}_q] + Q_a \cdot \ddot{O}_a \cdot \ddot{F}_n \cdot \ddot{E}_o \cdot \ddot{E}_\ddot{o} \cdot \ddot{E}_a \cdot \ddot{E}_{a\ddot{o}} \cdot \ddot{E}_\ddot{a} \rightarrow \max$$

где P – продукты утилизации хвостов; O – виды хвостов; П – процессы переработки хвостов; T – время переработки; F – фазы существования хранения; N – стадия использования хвостов; M_{ey} –

количество металлов из хвостов; Π_{my} – цена металлов; Q_y – количество восстановленных эффектов; Π_{qy} – цена утилизированных веществ; E_q – коэффициент процентной ставки на кредит для утилизации; E_x – коэффициент процентной ставки на кредит для производства металлов; E_{ay} – коэффициент процентной ставки на восстановление окружающей среды; M_e – количество потерянных металлов; Π_m – цена потерянных металлов; Q – количество потерянных эффектов; Π_q – цена потерянных полезных веществ; Q_e – количество эффектов поражения среды; Π_r – затраты на компенсацию глобальных факторов поражения; Z – затраты на управление; K – затраты на управление хранилищами; K_c – коэффициент самоорганизации хвостов; K_y – коэффициент утечки продуктов выщелачивания; K_r – коэффициент дальности утечки растворов; K_b – коэффициент влияния на биосферу; K_r – коэффициент влияния загрязнения на соседние регионы; K_{bp} – коэффициент реализации опасности со временем; K_r – коэффициент риска поражения окружающей среды от неучтенных факторов.

Новая технология может быть эффективно применена для приготовления твердеющих смесей при закладке выработанного пространства образованных подземной отработкой месторождений технологических пустот [19].

Использование техногенных скоплений хвостов первичной переработки руд и вовлечение в производство забалансовых руд является одним из основных элементов концепции гуманизации природопользования [20].

Заключение

Накопление на земной поверхности некондиционного металлосодержащего сырья будет еще интенсивнее формировать глобальную проблему, радикальным решением которой может быть только утилизация опасного при хранении и ценного при потере техногенного сырья, в первую очередь для приготовления твердеющих смесей при подземной добыче полезных ископаемых.

Из традиционных и новых методов обогащения обеспечить соответствие смеси экологическим и технологическим требованиям в течение минимального времени позволяет только механохимическая активация хвостов в дезинтеграторе. Открытая разработка месторождений уступает место подземной разработке, например, на месторождениях КМА.

Реализация концепции безотходной утилизации некондиционного минерального сырья обеспечивает возможность использования хвостов переработки для приготовления твердеющих смесей. Успех реализации концепции зависит от объемов комбинирования процессов химического выщелачивания и механической активации в дезинтеграторе в рамках единого ресурсосберегающего цикла. Конечной целью реализации концепции является включение хвостов переработки в природный оборот.

Если традиционные обогатительные процессы не обеспечивают полного раскрытия минералов и не могут быть востребованы при глубоком извлечении металлов из хвостов обогащения, то методмеханохимической активации повышает эффективность обогащения за счет увеличения количества и видов применяемой энергии, что обеспечивает быстрое проникновениевыщелачивающего раствора в образующиеся от разрушения частиц трещины.

Для эффективной реализации технологии механохимической активации необходимо решение

ряд вопросов: повышение стойкости рабочего органа дезинтегратора, оптимизации химического состава реагентов, селективное извлечение металлов из раствора и др.

Но не вызывает сомнения, что бесспорным эффектом предлагаемой технологии утилизации хвостов переработки является исключение необходимости их хранения на земной поверхности с минимизацией ущерба экосистемам окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амвросов А.Ф. Мониторинг опасных геологических процессов при недропользовании // ГИАБ. – 2014. – № 7. – С. 34–40.
2. Голик В.И., Полухин О.И. Подземная разработка месторождений. – М.: Инфра-М, 2013. – 263 с.
3. Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства // ГИАБ. – 2014. – № 11. – С. 25–31.
4. Трубецкой К.Н., Корнилов С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 67–73.
5. Новая технология и оборудование для высокопроизводительной закладки выработанного пространства при подземной отработке месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, В.А. Арсентьев, В.В. Квитка, Р.Ш. Маннанов // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 96–101.
6. Ветров С.В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. – М.: Наука, 1975. – 198 с.
7. Голик В.И., Полухин О.Н. Природоохранные технологии в горном деле. – Белгород: ИД Белгород НИУ БелГУ, 2013. – 281 с.
8. Golik V.I., Komashchenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources in Desintegrators // Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference. – Dresden, Germany, 14–19 October 2013. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 1101–1107. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_107.
9. Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators // Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference. – Dresden, Germany, 14–19 October 2013. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – P. 1047–1057. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_101.
10. Борзаковский Б.А., Русаков М.И., Генкин М.В. Технология добычи руды с закладкой на вязущем из хлористого кальция // ГИАБ. – 2014. – № 4. – С. 87–92.
11. Грехнев Н.И. Минеральные отходы горных предприятий – экономические и экологические проблемы недропользования в Дальневосточном регионе // ГИАБ. – 2014. – № 8. – С. 127–133.
12. Ермолович Е.А., Шок И.А. Техногенные отходы в составе закладочных композиционных материалов // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 87–92.
13. Хинт И.А. УДА-технология: проблемы и перспективы. – Таллин: Валгус, 1981. – 35 с.
14. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremenko A.B. Recycling of ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368. Doi: 10.4028.
15. Ракишев Б.Р. Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 123–129.
16. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt. – Freiberg, Germany: Medienzentrum der TU Bergakademie, 2014. – 413 p.
17. Голик В.И. Проблемы глубокой утилизации отходов переработки угля // Маркшейдерия и недропользование. – 2013. – № 4. – С. 57–63.
18. Терентьев Б.Д., Мухин С.Е. Проблема отходов угледобывающей промышленности на примере Восточного Донбасса и направления ее решения // ГИАБ. – 2013. – № 3. – С. 76–82.
19. Хашева З.М. О принципе симметрии региональной социально-экономической политики / Экономико-правовые аспекты стратегии модернизации России: к эффективной и нравственной экономике. Коллективная монография по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар: Изд-во ЮИМ, 2009. – С. 290–299.
20. Определение основных показателей использования недр. Разработка научных основ и способов ресурсосберегающей и экологически чистой технологии добычи полезных ископаемых / В.А. Шестаков, Ю.И. Разоренов, А.А. Белодедов, Т.В. Литовченко, С.А. Дубровин, Р.А. Малыгин. – Новочеркасск: Набл, 2005. – С. 95–102.

Поступила 16.12.2014 г.

UDC 504.55.054:622(470.6)

RATIONALE FOR FEASIBILITY OF USING ORE TAILINGS FOR MANUFACTURING HARDENING MIXTURES

Vladimir I. Golik,

Dr. Sc., North-Caucasian State Technological University, 44, Nikolaev street,
Vladikavkaz, 362021, Russia. E-mail: vigolik@mail.ru

Victor G. Lukyanov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia. E-mail: vigolik@mail.ru

Zarema M. Khasheva,

Dr. Sc., Southern Institute of Management, 216, Stavropolskaya street,
Krasnodar, 350040, Russia. E-mail: zarema_muratrovna@mail.ru

Relevance of the work is caused by the need to find affordable and cheap raw materials for manufacturing hardening mixtures as a means of non-destructive control over the state of the array in transition to underground mining.

The main aim of the research is to study the feasibility and economic viability of extracting metals and salts from ore tailings as a condition of their non-waste recycling as curing compounds and other goods.

Methods: laboratory studies in disintegrator installation Deux-11, including: study of tailings, metal leaching reagents in percolators, leaching of metals combined with reagents in a disintegrator, mathematical modeling of ecological and economic research, modeling parameters of mechanical activation and statistical processing of data based on multiple regression and correlation analysis.

Results. The paper introduces historical information about the use of disintegrators in mining. The authors have identified new patterns of extracting metals from tailings of ferrous and nonferrous metallurgy and coal washing, depending on the process variables. It is proved that the method of mechanical activation allows you to extract metals from the tailings to the level of sanitary requirements, which makes it possible to use the secondary tailings for preparing concrete products without restrictions. The authors carried out the feasibility study of the recommended mechanochemical technology with the development of integrated ecological-economic-mathematical model of the process and calculation of the economic effect of involving substandard mineral raw materials in production.

Conclusions. The authors determined quantitative parameters of metals extraction from tailings of ferrous and nonferrous metallurgy and coal washing, depending on the parameters of mechanical activation. The possibility of extracting metals from tailings by mechanical activation in the disintegrator to the level of sanitary requirements was proved. The author proposed the ecological and economic-mathematical model to evaluate the effectiveness of involving substandard mineral raw materials in production and stated the concept of waste-free processing of substandard mineral resources, including economic and environmental aspects.

Key words:

Mine, minerals, metals, tailings, disintegrator, activation, mechanical energy, mechanochemistry, economy, ecology, underground method, hardening mixture, mining.

REFERENCES

- Amvrosov A.F. Monitoring opasnykh geologicheskikh protsessov pri nedropolzovanii [Monitoring of dangerous geological processes in subsoil]. *GIAB*, 2014, no. 7, pp. 34–40.
- Golik V.I., Polukhin O.I. *Podzemnaya razrabotka mestorozhdeniy* [Underground mining]. Moscow, Infra-M, 2013. 263 p.
- Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Vliyanie geodinamicheskikh uslovy otrabotki rudnogo uchastka na tekhnologiyu ochistnykh rabot s zakladkoy vyrabotannogo prostranstva [Influence of geodynamic conditions of working on pillar mining with goaf stowing]. *GIAB*, 2014, no. 11, pp. 25–31.
- Troubetskoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. O novykh podkhodakh k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya gornogo proizvodstva [New approaches to sustainable development of mining production]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 67–73.
- Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Arsentev V.A., Kvitka V.V., Mannanov R.Sh. Novaya tekhnologiya i oborudovanie dlya vysokoproduktivnoy zakladki vyrabotannogo prostranstva pri podzemnoy otrabotke mestorozhdeniy [New technology and equipment for high-stowing when underground mining fields]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 96–101.
- Vetrov S.V. *Dopustimyye razmery obnazheny gornyykh porod pri podzemnoy razrabotke rud* [Allowable dimensions of rock outcrop in ore underground mining]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 198 p.
- Golik V.I., Polukhin O.N. *Prirodookhrannyye tekhnologii v gornom dele* [Environmental technologies in mining]. Belgorod, ID NIU Belgorod BSU Press, 2013. 281 p.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Rasorenov Y.I. Activation of Technogenic Resources in Desintegrators. *Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference*. Dresden, Germany, 14–19 October 2013. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 1101–1107. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_107.
- Golik V.I., Komashchenko V.I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailings in the Desintegrators. *Mine Planning and Equipment Selection: 22nd conference*. Dresden, Germany, 14–19 October 2013. Switzerland, Springer International Publishing, 2014. pp. 1047–1057. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_101.
- Borzhakovskiy B.A., Rusakov M.I., Genkin M.V. Tekhnologiya dobychi rudy s zakladkoy na vyazhushchem iz khloristogo kaltsiya [Technology ore production with laying on calcium chloride binder]. *GIAB*, 2014, no. 4, pp. 87–92.
- Grekhnov N.I. Mineralnye otkhody gornyykh predpriyatiy – ekonomicheskie i ekologicheskie problemy nedropolzovaniya v dalnevostochnom regione [Mineral waste of mining enterprises are the economic and environmental problems of subsoil in the Far East]. *GIAB*, 2014, no. 8, pp. 127–133.

12. Ermolovich E.A., Shock I.A. Tekhnogennye otkhody v sostave zakladochnykh kompozitsionnykh materialov [Technogenic waste as a part of filling composites]. *Mining Journal*, 2012, no. 9, pp. 87–92.
13. Khint I.A. *UDA-tehnologiya: problemy i perspektivy* [UDA-technology: problems and prospects]. Tallinn, Valgus publ., 1981. 35 p.
14. Golik V.I., Rasorenov Y.I., Efremenko A.B. Recycling of ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368. DOI: 10.4028.
15. Rakishev B.R. Kompleksnoe ispolzovanie rudy na predpriyatiyakh tsvetnoy metallurgii Kazakhstana [Integrated use of ores in non-ferrous metallurgy of Kazakhstan]. *Mining Journal*, 2013, no. 7, pp. 123–129.
16. Polukhin O.N., Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt C. *Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailing usage in solidifying mixtures production*. Freiberg, Germany, Medienzentrum der TU Bergakademie, 2014. 413 p.
17. Golik V.I. Problemy glubokoy utilizatsii otkhodov pererabotki uglya [Problems of deep utilization of coal processing waste]. *Mine surveying and subsoil*, 2013, no. 4, pp. 57–63.
18. Terentev B.D., Mukhin S.E. Problema otkhodov ugledobyvayushchey promyshlennosti na primere Vostochnogo Donbasa i napravleniya ee resheniya]. The problem of coal industry waste by the example of the Eastern Donbass and directions of its solution]. *GIAB*, 2013, no. 3, pp. 76–82.
19. Khasheva Z.M. O printsipe simmetrii regionalnoy sotsialno-ekonomicheskoy politiki [The reflection principle of regional economic and social policy]. *Ekonomiko-pravovye aspekty strategii modernizatsii Rossii: k effektivnoy i нравstvennoy ekonomike* [Economic and legal aspects of Russia modernization strategy: an efficient and moral economy]. Krasnodar, YuIM Publ., 2009. pp. 290–299.
20. Shestakov V.A., Rasorenov Yu.I., Belodedov A.A., Litovchenko T.V., Dubrovin S.A., Malygin R.A. Opredelenie osnovnykh pokazateley ispolzovaniya neдр. Razrabotka nauchnykh osnov i sposobov resursosberegayushchey i ekologicheskoy chistoy tekhnologii dobychi poleznykh iskopaemykh [Determination of the main indicators of subsurface use. Development of scientific principles and methods of resource-saving and environmentally friendly technologies mining]. Novocherkassk, Nabla Publ., 2005. pp. 95–102.

Received: 16 December 2014.

УДК 620.186.5:621.181.2

РОЛЬ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ В ПОВЫШЕНИИ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Помазова Анна Викторовна,

аспирант кафедры «ПиМФ» ФГБОУ ВПО «Омский Государственный
Университет им. Ф.М. Достоевского», Россия, 644077, г. Омск,
пр. Мира, 55а. E-mail: pomazova@yandex.ru

Панова Татьяна Викторовна,

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «ПиМФ» ФГБОУ ВПО «Омский
Государственный Университет им. Ф.М. Достоевского», Россия, 644077,
г. Омск, пр. Мира, 55а. E-mail: panova@omsu.ru

Геринг Геннадий Иванович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «ПиМФ»
ФГБОУ ВПО «Омский Государственный Университет им. Ф.М. Достоевского»,
Россия, 644077, г. Омск, пр. Мира, 55а. E-mail: gering@omsu.ru

Рассмотрены возможности применения многократной структурной перекристаллизации для улучшения эксплуатационных характеристик стали 20, используемой для изготовления труб поверхностей нагрева. Актуальность работы обусловлена непрерывным увеличением числа коррозионных повреждений элементов котельных агрегатов. Проведена оценка влияния параметров микроструктуры (разнозернистости) на коррозионную стойкость, и предложен способ термической обработки, повышающий эксплуатационную надежность труб. Установлена существенная зависимость коррозионных характеристик от размерных параметров зерен. Наиболее эффективными режимами, уменьшающими разнозернистость микроструктуры, являются режим двукратной нормализации при температуре 920, 930 °С и однократный режим при 940 °С. Максимального значения 0,49 фактор разнозернистости достигает при двукратной нормализации при температуре 920 °С. При указанном режиме значение средней площади зерен феррита уменьшается на 42 %, значение фактора разнозернистости увеличивается в 3,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Этот режим термообработки обеспечивает минимальную скорость коррозии, при этом механические свойства находятся в пределах требований соответствующих нормативных документов. Обнаружено уменьшение глубины межкристаллитных трещин в 1,5 раза (с 31,7 до 21,1 мкм) по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, прошедших рекомендуемую ТУ-14-3Р-55-2001 термообработку. Применение режима двукратной нормализации при 920 °С для термообработки углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, позволит увеличить срок эксплуатации тепловоспринимающих элементов котла за счет значительного снижения скорости наружной коррозии.

Ключевые слова:

Разнозернистость микроструктуры, наружная коррозия, межкристаллитная коррозия, ресурс котельных труб.

Введение

Возможные пути повышения срока эксплуатации теплоэнергетического оборудования, в частности тепловоспринимающих элементов котлов, предусматривают мероприятия, которые направлены на совершенствование водно-химических режимов [1, 2], на контроль металла [3, 4], на использование коррозионно-стойких сталей и сплавов [5], на анализ наличия примесей и химической неоднородности [6–8]. Перспективным и простым направлением повышения надежности теплоэнергетического оборудования является изменение свойств углеродистых сталей с точки зрения совершенствования характеристик микроструктуры. Часть работ в этом направлении посвящена изучению эволюции структурно-фазового состояния при эксплуатации и связанному с этим неизменному снижению прочностных свойств теплоэнергетического оборудования [9–12]. В работах [13–15] исследуются возможности управления структурой металлических материалов, обладающей необходимыми механическими свойствами. Следует отметить, что дан-

ных по улучшению коррозионной стойкости изделий, изготовленных из малоуглеродистых сталей, недостаточно для выработки единых требований к структурным характеристикам углеродистых сталей, используемых для изготовления труб поверхностей нагрева [16, 17]. В частности, современные подходы к решению проблемы повреждаемости труб поверхностей нагрева энергетических котлов, предложенные авторами [18, 19], основаны на анализе внутренних структурных напряжений первого и второго рода. При этом разработанные ими режимы паровоздушной термической обработки образцов из стали 20, эффективно замедляющие структурную коррозию, не обеспечивают необходимой коррозионной стойкости при развитии равномерной коррозии на наружной поверхности труб, эксплуатируемых при достаточно низких параметрах: $T < 350$ °С, $P < 15,5$ МПа. Поэтому целью исследования является создание способа термической обработки с минимальным количеством технологически простых операций, обеспечивающего повышение коррозионной стойкости малоуглеро-

дистой стали 20 при сохранении требуемых по ТУ 14-ЗР-55-2001 механических свойств и стоимостных показателей, с возможностью его реализации в промышленном производстве на широко распространенном промышленном оборудовании простым и экономичным способом.

В практике термической обработки стали 20 рекомендуемый температурный интервал нормализации для труб поверхностей нагрева составляет 900...950 °С [20, 21]. При этом для стали решающее значение в формировании микроструктуры имеет количество циклов и температура фазовой перекристаллизации [22]. В настоящее время в теплоэнергетике используются введенные с 01.03.2004 г. технические условия (ТУ 14-ЗР-55-2001) [23], согласно которым котельные трубы из углеродистой стали 20 поставляют в термообработанном состоянии, подвергая однократному режиму нормализации в температурном интервале 920...950 °С. В данной работе проведены исследования при расширенных температурных параметрах и циклах нормализации с целью выравнивания размеров зерен феррита в стали 20 и повышения коррозионной стойкости труб поверхностей нагрева.

Материалы и методики эксперимента

Для морфологического анализа структурных составляющих стали 20 (состав, мас. %: углерод 0,175±0,016; кремний 0,27±0,03; марганец 0,45±0,03; хром 0,081±0,008; никель 0,033±0,008; медь 0,041±0,008; сера 0,004±0,002; фосфор 0,007±0,002; остальное железо) применялся металлографический анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Ресурс С7», программный комплекс которого специально дополнен и доработан для задач настоящей работы специалистами компании ООО «Сиамс». Нормализация проводилась в печи муфельной МИМП-10У. Механические испытания проводились на разрывной машине Р-5. Образцы стали 20, вырезанные из трубной заготовки с типоразмером 32,0×4,0 мм, подвергались циклической нормализации, количество циклов варьировалось от одного до пяти. Расчет фактора разнотерности проводился в программном комплексе в соответствии с [24] по формуле:

$$F_z = \frac{f_{\max} \cdot Z_{\max}}{\sum f_i \cdot Z_i},$$

где f_i – доля зерна с определенным баллом, %; $f_{\max}$ – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе, %; Z_i – балл зерна; $Z_{\max}$ – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

Скорость коррозии рассчитывалась по потере массы образца за время испытания:

$$V = \frac{m_0 - m}{t},$$

где m_0 – исходная масса образцов; m – масса образца после испытания; t – время испытания. Время испытания составило 24 (t_1) и 168 (t_2) часов.

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что в исходном состоянии структура стали 20 состоит из крупнозернистого феррита и перлита. Средняя площадь зерна феррита составляет 84,7 мкм². Неравномерность образования перлита по границам зерен феррита указывает на незавершенность процесса кристаллизации и неравновесное состояние стали 20 (рис. 1, а).

Партии образцов, изготовленные из стали 20, были подвергнуты многократной нормализации при температурах 900, 910, 920, 930, 940, 950 °С. Установлено, что два цикла фазовой перекристаллизации при 900 °С приводят микроструктуру в равновесное состояние, выравнивая и измельчая размеры зерен и более равномерно распределяя перлит между ферритом (рис. 1, б). Средние площади зерен феррита уменьшаются до 55,1 мкм². После двукратного цикла нормализации фактор разнотерности достигает максимального значения. Последующие циклы фазовой перекристаллизации не оказывают значительного влияния на средний размер зерен феррита и дисперсность перлита. После третьего цикла нагрева-охлаждения наблюдается минимальное значение фактора разнотерности, четвертый и пятый циклы нормализации повышают однородность зеренной структуры. Аналогичные исследования при температурах 900, 910, 920, 930, 940, 950 °С представлены на рис. 2. Видно, что режим двукратной нормализации при температуре 920 °С формирует более мелкозернистую равноосную феррито-перлитную структуру с низкой разнотерностью. Значение средней площади зерна феррита уменьшается на 42 % (с 84,7 до 49,3 мкм²). Значение фактора разнотерности после двукратного цикла нормализации увеличивается в 3,3 раза (с 0,15 до 0,49) по сравнению с исходным состоянием. При этом установлено, что при пятикратной нормализации при 910 °С, четырех-пятикратной при 920 °С, трех-пятикратной при 930 и 940 °С, двух-пятикратной при 950 °С (рис. 1, д) наблюдается ярко выраженная грубая видманштеттовская структура с массивными иглами и ферритной сеткой по границам зерен, что соответствует 4–5 баллам ГОСТ 5640 [25]. Наличие видманштеттовой структуры выше 3-го балла в микроструктуре труб поверхностей нагрева не допускается [23].

Для установления зависимости изменения механических свойств от фактора разнотерности были проведены испытания на статическое растяжение при комнатной температуре. Обнаружено, что по мере увеличения температуры термообработки и количества циклов механические свойства ухудшаются, однако они находятся в пределах требований ТУ 14-ЗР-55-2001. В образцах, в микроструктуре которых наблюдается видманштетт, пределы прочности и текучести заметно выше, а пластичность ниже, чем в образцах с однородной зеренной структурой. Браковочные уровни меха-

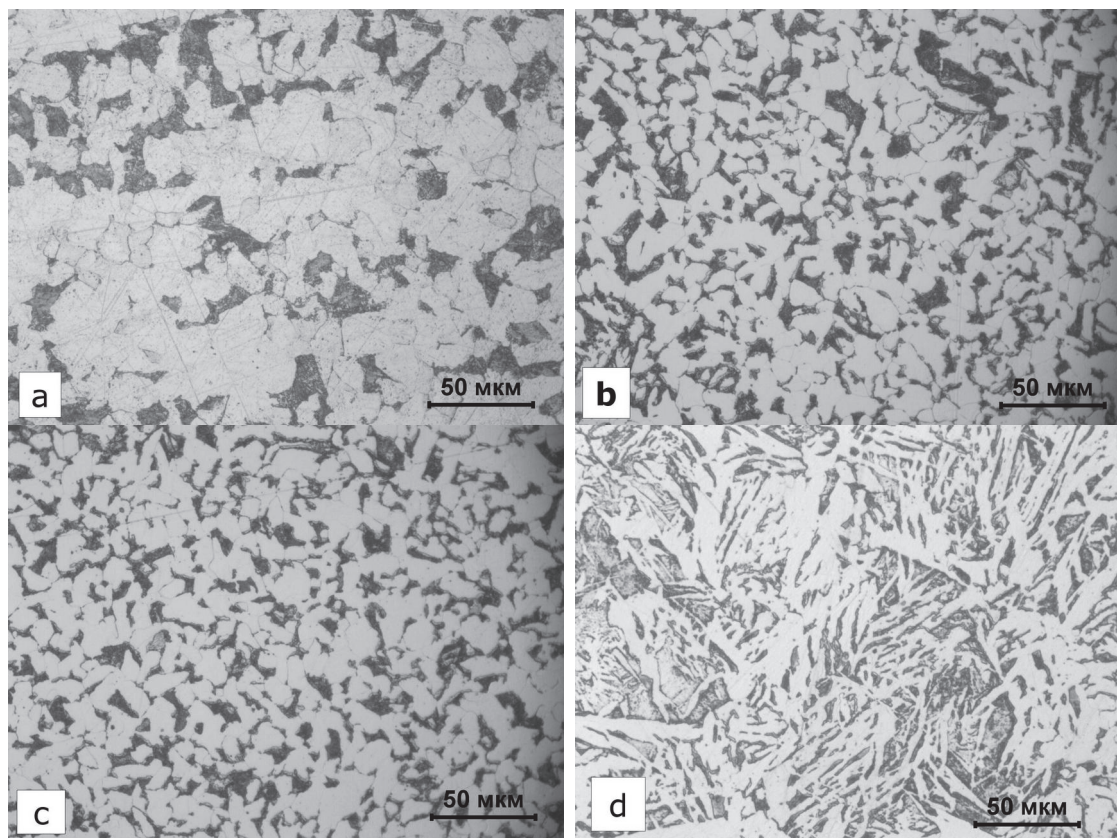


Рис. 1. Микроструктура трубной заготовки из стали 20 в исходном состоянии (а), после двукратной нормализации при б) 900; с) 920; д) 950 °С

Fig. 1. Microstructure of a pipe shell of steel 20 in initial condition (a), after double normalization at б) 900; с) 920; д) 950 °С

нических свойств образцов полностью соответствуют тем режимам нормализации, при которых происходит образование грубой видманштеттовой структуры. Исключение составляет образец, подвергнутый двукратной нормализации при температуре 940 °С, механические свойства которого немного ниже требуемых по ТУ 14-ЗР-55-2001.

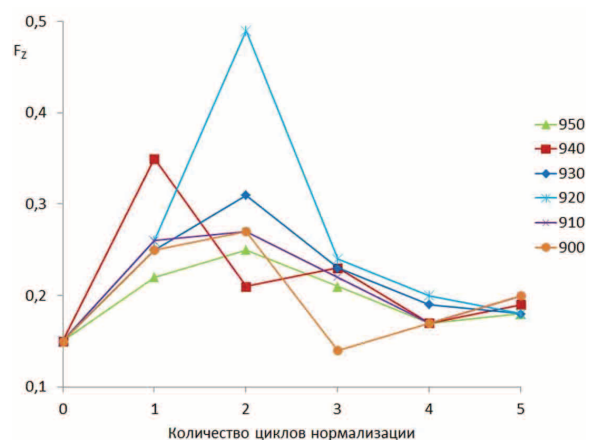


Рис. 2. Зависимость фактора разнородности от количества циклов нормализации

Fig. 2. Dependence of inequigranular factor on the amount of normalization cycles

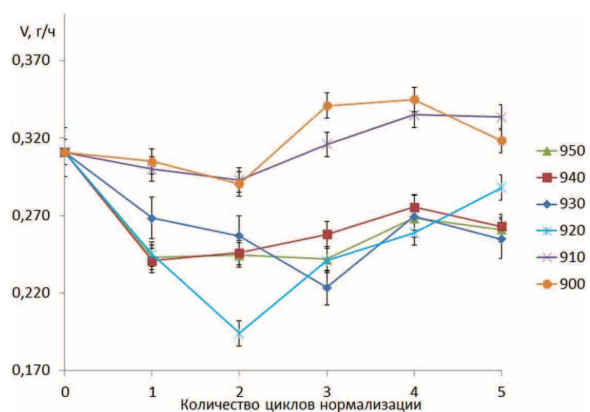


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии от количества циклов при различных температурах структурной перекристаллизации ($t_i=24$ часа)

Fig. 3. Dependence of corrosion rate on the amount of cycles at different temperatures of structural recrystallization ($t_i=24$ h)

Поскольку одной из основных причин повреждения труб поверхностей нагрева за отопительный сезон является наружная коррозия [26], были проведены испытания на коррозионную стойкость в условиях, имитирующих агрессивную среду топочных газов. Анализы отложений на наружной

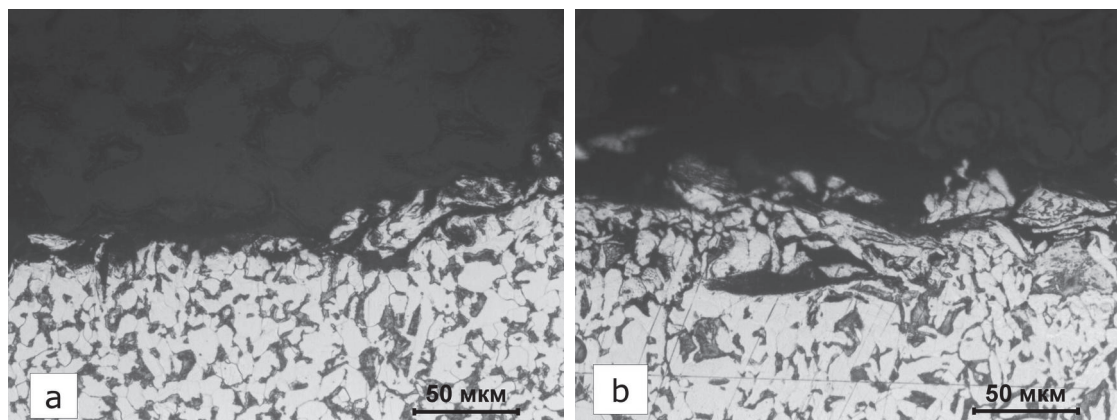


Рис. 4. Поверхности трубной заготовки из стали 20, подвергнутые а) двукратной нормализации при 920 °С; б) трехкратной нормализации при 900 °С

Fig. 4. Surfaces of pipe shell of steel 20 subjected to a) double normalization at 920 °C; b) triple normalization at 900 °C

поверхности и протоколы выбросов показали, что основными продуктами коррозии являются FeS и Fe₃O₄. Образование FeS обусловлено наличием соединений серы в мазуте. Коррозионные испытания заключались в выдержке в течение определенного времени испытуемых образцов в агрессивной среде, содержащей сероводород. Изменение скорости коррозии по мере увеличения циклов и температуры нормализации иллюстрирует рис. 3.

Видно, что заметное снижение скорости коррозии наблюдается у образцов, подвергнутых нормализации при температуре 920 °С и выше. Аналогичные результаты получаются и при увеличении времени коррозионных испытаний. Наименьшая скорость коррозии наблюдается при двукратной нормализации при 920 °С. Установлено, что при режиме двукратной нормализации при t_1 снижение этой величины составляет 38 % от исходного значения, при увеличении времени испытания до t_2 скорость коррозии уменьшается на 51 %. После третьего цикла нормализации эта величина уменьшается на 23 и 35 %, после четвертого – на 16 и 29 %, после пятого – на 7 и 20 % для времени испытания t_1 и t_2 соответственно. Большая эффективность двукратной нормализации при увеличении времени испытания указывает на хорошую адгезионную связь продуктов коррозии с поверхностью испытуемого металла. Снижение скорости коррозии при этом объясняется пассивирующими свойствами образовавшихся продуктов коррозии, более равномерно распределенных на сформировавшейся однородной зеренной структуре. Металлографический анализ показал, что после первого цикла нормализации при 920 °С глубина межкристаллитных трещин сокращается в 1,5 раза (с 47,3 до 31,7 мкм), при двукратной нормализации при 920 °С – в 2,2 раза (с 47,3 до 21,1 мкм) при малом времени испытания по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, не подвергнутых термообработке.

Поверхности образцов, на которых наблюдалась минимальная (режим термообработки – двукратная нормализация при 920 °С) и максимальная (режим термообработки – трехкратная нормализация при 900 °С) скорости коррозии при длительных испытаниях, приведены на рис. 4. Глубина межкристаллитных трещин составила 36,5 и 104,0 мкм соответственно.

На рис. 5 представлена зависимость скорости коррозии от фактора разнородности микроструктуры образцов, показавших удовлетворительные результаты по механическим и микроструктурным характеристикам.

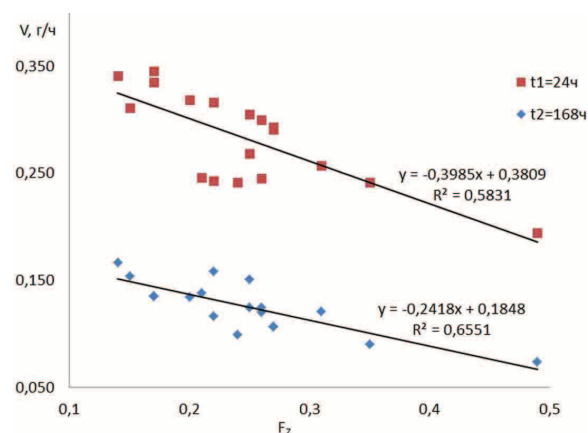


Рис. 5. Зависимость скорости коррозии от фактора разнородности

Fig. 5. Dependence of corrosion rate on inequigranular factor

Из графика видно, что скорость коррозии уменьшается с увеличением степени неоднородности зеренной структуры. Любой вид неоднородности (по составу, электропроводности и напряжению отдельных участков, наличию примесей и т. п.) может приводить к увеличению скорости коррозии, однако их вклад в коррозионную стойкость незначительный по сравнению с фактором разнородности.

стости. Полученные данные свидетельствуют о существенной зависимости коррозионных характеристик от размерных параметров зерен.

Заключение

Проведенные исследования показали, что режим двукратной нормализации при 920 °С повышает однородность микроструктуры и увеличивает коррозионную стойкость углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, на 38...51 % при

варьировании времени испытания от 24 до 168 часов. Трехкратное увеличение фактора разнородности позволило при этом режиме термообработке сократить глубину межкристаллитных трещин в 1,5 раза (с 31,7 до 21,1 мкм) по сравнению с трещинами, образовавшимися на образцах, прошедших рекомендуемую по ТУ-14-ЗР-55-2001 термообработку. Использование разработанного режима термообработки позволит существенно увеличить срок эксплуатации тепловоспринимающих элементов котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones D.R.H. Corrosion of Central Heating Systems // Engineering Failure Analysis. – 1997. – № 4. – С. 179–194.
2. Гуревич В.З. Трубопроводы тепловых и атомных электростанций. – М.: НИИ Энергомаш, 1981. – 525 с.
3. Штромберг Ю.Ю. Контроль металла на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 1996. – № 12. – С. 17–20.
4. Tamehiro H., Yamada N., Matsuda H. Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-strength Low Alloy Steel // Transactions ISIJ. – 1985. – № 25. – С. 54–61.
5. Басин А.С., Чапаев Д.Б., Кореньков А.И. Задачи повышения долговечности металла труб тепловых сетей // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 6. – С. 41–43.
6. Морозова Т.В. Влияние технологии производства стали на однородность структуры и загрязненность неметаллическими включениями с целью повышения надежности магистральных трубопроводов: дис.... канд. техн. наук. – М., 2012. – 129 с.
7. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г., Курганова Ю.А. Теория и практика повышения надежности и работоспособности конструкционных металлических материалов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 286 с.
8. Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments / G.M. Omweg, G.S. Frankel, W.A. Bruce, J.E. Ramirez, G. Koch // Corrosion. – 2003. – № 59. – С. 640–653.
9. Овчинников В.П., Кирсанов Ю.Я. Критерии предельного состояния и ресурс эксплуатации гибов паропроводов // Оценка надежности и методы контроля металла и сварки энергооборудования, отработавшего расчетный срок. – Кемерово: Кемеровское изд-во, 1982. – С. 27–35.
10. Пискаленко В.В. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств котельных сталей: дис.... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2002. – 169 с.
11. Сизова О.В., Подборонников С.Ф., Громов В.Е., Данилов В.И. Об изменении механических свойств и структуры котельной стали в процессе эксплуатации // Вестник горно-металлургической секции академии естественных наук. Отделение металлургии. – 1994. – № 1. – С. 108–113.
12. Urtsev V.N., Morozov A.A., Kaptan A.V. The Features of Austenite to Ferrite Transformation for Carbon Steel // International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy. – Sao Paulo, 1994. – № 1. – С. 251–259.
13. Тушинский Л.И. Новые пути создания оптимальных структур сплавов // Новые методы упрочнения и обработки металлов: межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НЭТИ, 1980. – С. 3–32.
14. Батаев В.А. Управление структурой сталей на различных масштабных уровнях в процессах комбинированного упрочнения: дис.... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2002. – 430 с.
15. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с.
16. Климов П.В. Исследование и разработка методов торможения стресс-коррозии на магистральных газопроводах: дис.... д-ра техн. наук. – Уфа, 2012. – 337 с.
17. Погорелова И.Г. Исследование структурных особенностей и разработка способа повышения прочности и коррозионной стойкости трубной стали при комбинированной термообработке: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2008. – 229 с.
18. Анализ внутренних структурных напряжений I и II рода как основа повышения надежности поверхности нагрева котлов / А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.С. Загорин, Р.Н. Фисенко, А.А. Ташлыков // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 4 (10). – С. 19–26. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/807/565> (дата обращения: 15.09.2014).
19. Артамонов А.И. Коррозионные проявления микроструктурных повреждений в трубах тепловоспринимающих элементов и трубопроводных систем: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 120 с.
20. Биронт В.С. Теория термической обработки металлов. – Красноярск: ИЦМиЗ, 2007. – 434 с.
21. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
22. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
23. ТУ 14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – М.: РНИИТП, 2001. – 84 с.
24. Гроховский В.И. Возможности цифровой микроскопии в металлографии // Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара. – 2001. – № 1. – С. 18–20.
25. ГОСТ 5640-68. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 8 с.
26. Березина Т.Г. Коррозия металла деталей теплоэнергетического оборудования. – Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2000. – 58 с.

Поступила 08.02.2015 г.

UDC 620.186.5:621.181.2

ROLE OF STRUCTURAL FACTORS IN IMPROVING CORROSION RESISTANCE OF PIPE STEEL UNDER CYCLIC HEAT TREATMENT

Anna V. Pomazova,

Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: pomazova@yandex.ru

Tatyana V. Panova,

Cand. Sc., Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: panova@omsu.ru

Gennadiy I. Gering,

Dr. Sc., Omsk F.M. Dostoevsky State University, 55a, Mira Avenue, Omsk, 644077, Russia. E-mail: gering@omsu.ru

The paper discusses the possibility of using multiple structural recrystallization to improve the performance of the 20 steel used for manufacturing heating surface tubes. Relevance of the work is caused by the continuous increase in number of corrosion damage elements of boilers. The authors have evaluated the influence of microstructure parameters (inequigranular) on the corrosion resistance and proposed the method of heat treatment which increases the operational reliability of the pipes. The essential dependence of corrosion characteristics of dimensional parameters of the grains was determined. The most effective mode that reduces inequigranular microstructure is double normalization mode at 920 °C and a single mode at 940 °C. The maximum value of 0,49 the inequigranular factor reaches at double normalization at 920 °C. In this mode the value of the average area of ferrite grains decreases by 42 %, the value of the inequigranular factor increases in 3,3 times in comparison with the baseline. This heat treating mode ensures minimal corrosion rate, while the mechanical properties are within the requirements of the relevant regulations. There is a decrease in depth of intergranular cracks in 1,5 times (from 31,7 to 21,1 microns) in comparison with the cracks formed on the samples held on the recommended TU 14–3r-55–2001 heat treatment. Application of the double normalization mode at 920 °C for heat treatment of carbon steel 20 used in heat power engineering for manufacturing heating surface tubes, will increase the life of heat exchanger elements of a boiler due to significant decrease in the rate of external corrosion.

Key words:

Inequigranular of microstructure, external corrosion, intercrystalline corrosion, resource of boiler tubes.

REFERENCES

1. Jones D.R.H. Corrosion of Central Heating Systems. *Engineering Failure Analysis*, 1997, no. 4, pp. 179–194.
2. Gurevich V.Z. *Truboprovody teplovykh i atomnykh elektrostantsii* [Piping of Thermal and Nuclear Power Plants]. Moscow, NII Energomash Publ., 1981. 525 p.
3. Shtromberg Yu.Yu. Kontrol metalla na teplovykh elektrostantsiyakh [Control of Metal in Thermal Power Plants]. *Thermal Engineering*, 1996, no. 12, pp. 17–20.
4. Tamehiro H., Yamada N., Matsuda H. Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-strength Low Alloy Steel. *Transactions ISIJ*, 1985, no. 25, pp. 54–61.
5. Basin A.S., Chapaev D.B., Korenkov A.I. Zadachi povysheniya dolgovechnosti metalla trub teplovykh setey [The Problem of Increasing the Durability of Pipe Metal in Heating Networks]. *Steel in Translation*, 2001, no. 6, pp. 41–43.
6. Morozova T.V. *Vliyaniye tekhnologii proizvodstva stali na odnorodnost struktury i zagryaznennost nemetallicheskimy vkhlyucheniya-mi s tselyu povysheniya nadezhnosti magistralnykh truboprovodov*. Dis. Kand. nauk [The Impact of Steel Production Technology on Structural Homogeneity and Contamination with Non-Metallic Inclusions to Improve the Reliability of the Main Pipelines. Cand. Diss.]. Moscow, 2012. 129 p.
7. Terentev V.F., Kolmakov A.G., Kurganova Yu.A. *Teoriya i praktika povysheniya nadezhnosti i rabotosposobnosti konstruktivnykh metallicheskiykh materialov* [Theory and Practice of Increasing the Reliability and Efficiency of Structural Metallic Materials]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2010. 286 p.
8. Omweg G.M., Frankel G.S., Bruce W.A., Ramirez J.E., Koch G. Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments. *Corrosion*, 2003, no. 59, pp. 640–653.
9. Ovchinnikov V.P., Kirsanov Yu.Ya. Kriterii predelnogo sostoyaniya i resurs ekspluatatsii gibov paroprovodov [Limit State Criteria and Exploitation Resource of Steam Pipelines Bends]. *Otsenka nadezhnosti i metody kontrolya metalla i svarki energooborudovaniya, obrabotavshogo raschetnyy srok* [Evaluation of reliability and methods of control of power metal and welding spent design life]. Kemerovo, Kemerovskoe izdatelstvo, 1982. pp. 27–35.
10. Piskalenko V.V. *Evolutsiya strukturno-fazovogo sostoyaniya i mekhanicheskikh svoystv kotelnykh staley*. Dis. Kand. nauk [Evolution of Structural and Phase State and Mechanical Properties of Steel Boiler. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 2002. 169 p.
11. Sizova O.V., Podboronnikov S.F., Gromov V.E., Danilov V.I. Ob izmenenii mekhanicheskikh svoystv i struktury kotelnoy stali v protsesse ekspluatatsii [On the Change of Mechanical Properties and Structure of Steel Boiler in Operation]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekti akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*, 1994, no. 1, pp. 108–113.
12. Urtsev V.N., Morozov A.A., Kaptan A.V. The Features Of Austenite to Ferrite Transformation for Carbon Steel. *International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy*, 1994, no. 1, pp. 251–259.
13. Tushinskii L.I. Noveye puti sozdaniya optimalnykh struktur splavov [New Ways of Creating the Optimal Structure of the Alloy]. *Noveye metody uprochneniya i obrabotki metallor: Mezhdvuz. sb.nauch.tr.* [New methods of hardening and processing of metals: Interuniversity collection of scientific labors]. Novosibirsk, NETI Publ., 1980. pp. 3–32.
14. Bataev V.A. *Upravleniye strukturoy staley na razlichnykh mashtabnykh urovnyakh v protsessakh kombinirovannogo uprochneniya*. Dis. Kand. nauk [Control over Steel Structure at Different Scale Levels During Combined Hardening. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2002. 430 p.

15. Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V. *Vysokoenergeticheskie protsessy obrabotki materialov* [High Energy Processes of Processing Materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 425 p.
16. Klimov P.V. *Issledovanie i razrabotka metodov tormozheniya stress-korrozii na magistralnykh gazoprovodakh*. Dis. Dokt. nauk [Research and Development of Methods for Stress Corrosion Inhibition on Gas Pipelines. Dr. Diss.]. Ufa, 2012. 337 p.
17. Pogorelova I.G. *Issledovanie strukturnykh osobennostey i razrabotka sposoba povysheniya prochnosti i korrozionnoy stoykosti trubnoy stali pri kombinirovannoy termoobrabotke*. Dis. Kand. nauk [Research of structural features and development of the method for increasing strength and corrosion resistance of pipe steel at complex heat treatment. Cand. Diss.]. Rostov-on-Don, 2008. 229 p.
18. Makeev A.A., Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Fisenko R.N., Tashlykov A.A. *Analiz vnutrennikh strukturnykh napryazhenii I i II roda kak osnova povysheniya nadezhnosti poverkhnosti nagreva kotlov* [Analysis of Internal Structural Stress of the I and the II type as a Basis for Improving the Reliability of Boiler Heating Surface]. *Vestnik nauki Sibiri*, 2013, no. 4 (10), pp. 19–26. Available at: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/807/565> (accessed 15.09.2014).
19. Artamontsev A.I. *Korroziyonnye proyavleniya mikrostrukturnykh povrezhdeniy v trubakh teploosprinyimayushchikh elementov i truboprovodnykh system*. Dis. Kand. nauk [Corrosive manifestations of microstructural damages in the pipes of heat exchanger elements and piping systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2007. 120 p.
20. Biront V.S. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of Heat Treatment of Metals]. Krasnoyarsk, ITsMiZ Publ., 2007. 434 p.
21. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskiy Yu.V. *Marochnik staley i splavov* [Database of Steel and Alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
22. Dyachenko S.S. *Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavakh* [Formation of Austenite in the Iron-Carbon Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 128 p.
23. *TU 14-3R-55-2001. Truby stalnye besshovnye dlya parovykh kotlov i truboprovodov* [Specifications 14-3R-55-2001. Seamless steel tubes for boilers and pipelines]. Moscow, RNIITP Publ., 2001. 84 p.
24. Grokhovskiy V.I. *Vozможности tsifrovoy mikroskopii v metallografii* [Possibilities of Digital Microscopy in Metallography]. *Tsifrovaya mikroskopiya. Materialy shkoly-seminara*, 2001, no. 1, pp. 18–20.
25. *GOST 5640-68. Stal. Metallograficheskiy metod otsenki mikrostrukтуры listov i lent* [State Standard 5640-68. Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 8 p.
26. Berezina T.G. *Korroziya metalla detaley teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Corrosion of Metal of Heat and Power Equipment Parts]. Chelyabinsk, CHF PEIPK, 2000. 58 p.

Received: 08 February 2015.

УДК 536.462

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ИК-ДИАГНОСТИКИ В УЗКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Агафонцев Михаил Владимирович,

студент магистратуры механико-математического факультета
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина 36. E-mail: kim75mva@gmail.com

Лобода Егор Леонидович,

д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физической и вычислительной механики
Механико-математического факультета Томского государственного
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.
E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Рейно Владимир Владимирович,

ведущ. науч. сотр. Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: reyno@iao.ru

Актуальность работы. При моделировании процессов горения часто возникает необходимость в определении поля температуры. Традиционные методы экспериментального исследования процессов горения предполагают применение большого количества термопар для определения полей температуры в пламени, что вызывает трудности по определению температуры. К тому же термопара определяет температуру не в конкретной точке пространства, а в некоторой области, радиуса порядка десяти диаметров термопары. Кроме того, при использовании термопарного метода нужно учитывать свойство инерционности и сток тепла по свободным концам. Современные методы ИК-диагностики с использованием тепловизоров позволяют отказаться от применения большого числа термопар и при этом получить приемлемое пространственное разрешение с высокой детализацией по времени.

Методы исследования. Рассматривается экспериментальное исследование изменения температуры в пламени. В качестве исследуемого объекта было выбрано пламя, образующееся в процессе горения различных видов топлива. Производилась съемка процесса горения с помощью тепловизора в различных спектральных диапазонах. Одновременно температура в пламени контролировалась при помощи термопары, по данным с которой корректировался коэффициент излучения. На полученной термограмме выбирались 20 точек, расположенных на одной вертикальной оси. Для каждой из них получали массив температур, к которым в дальнейшем применялся метод быстрого преобразования Фурье. После проделанной работы были получены частотно-амплитудные спектры изменения температуры.

Результаты. Были выявлены характерные пульсации температуры. Для исследованных жидких топлив частотные максимумы располагаются от 4 до 16 Гц. Для растительных горючих материалов частотные максимумы были обнаружены в интервале от 2 до 7 Гц.

Ключевые слова:

Температура, пламя, ИК-излучение, ИК-камера, ИК-диагностика.

При проведении экспериментальных исследований процессов горения [1] и природных пожаров традиционно используется большое количество термопар для регистрации полей температур. Современные методы ИК-диагностики [2, 3] с использованием тепловизоров позволяют отказаться от использования большого числа термопар. При этом применение методов ИК-диагностики позволяет получить значительно лучшее разрешение по пространству и времени и избежать тех недостатков, которые свойственны контактному методам измерений, таких как:

- 1) внесение возмущения в структуру течения пламени, вызывающие искривление и отклонения факела пламени;
- 2) достаточно большая инерционность даже при малых диаметрах спая термопары;
- 3) определение не мгновенная температура в данной точке факела пламени, а некоторой осредненной величины температуры термопары;

- 4) необходимость учитывать сток тепла за счет теплопроводности термопары;

- 5) невозможность получить хорошее пространственное разрешение при измерениях.

Однако при использовании методов ИК-диагностики возникают трудности, связанные с определением коэффициентов излучения и пропускания пламени, выбором спектрального диапазона исследования, а также анализом влияния слоя пламени на регистрацию температур экранированных им объектов. Так, например, при исследовании горения растительных горючих материалов в спектральном интервале 2,5–2,7 мкм коэффициент излучения пламени зависит от влагосодержания горючих материалов [4].

В основном исследования в области ИК-диагностики электротехнического и теплового оборудования связаны с измерением температуры твердых сред. Методы ИК-диагностики очень широко применяются для исследования поведения микро-

электронных устройств [5], мониторинга энергетических установок и строительных объектов, неразрушающего контроля материалов и изделий [6]. Для определения профиля температуры на фронте экзотермической автокаталитической реакции в работе [7] применялись методы ИК-диагностики, в частности использовался тепловизор FLIR SC 5500 со спектральным интервалом $2,5\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$. Следует отметить, что в работе не приводится спектр излучения фронта реакции, а в случае процессов горения, которые будут описаны далее, применение такого широкого спектрального интервала не является корректным, т. к. функционально все тепловизоры разработаны для измерения температур твердых тел и калибруются по излучению модели абсолютно черного тела (АЧТ), спектр излучения которого определяется законом Планка.

В области исследования процессов горения и, в частности, природных пожаров [8–10] использование методов ИК-диагностики мало распространено ввиду сложности исследуемого объекта и недостатка знаний о его свойствах, например о величине коэффициента излучения (ε_i) [8] и дороговизны специальных тепловизоров, пригодных для научных исследований. Тем не менее, данный способ определения характеристик фронта горения является перспективным. Например, можно отметить работы сначала 11 [12–14], где рассматривается измерение параметров лесного пожара в среднем ИК-диапазоне длин волн, а также работы [15–17], где приведены результаты исследований для спектральных интервалов $7,5\text{--}13$ и $8\text{--}12$ мкм соответственно.

В работе [18] приведены результаты исследований по влиянию слоя пламени на регистрацию АЧТ в спектральном интервале $7,5\text{--}13$ мкм при изменении температуры АЧТ от 253 до 1773 К, однако в этом диапазоне длин волн отсутствует достаточно интенсивное излучение от самого пламени, что показано в работе [19] на примере спектра излучения пламени. Кроме того, в работе [18] приведены зависимости коэффициента излучения пламени для указанного диапазона длин волн в зависимости от толщины слоя пламени. Следует от-

метить, что данные зависимости пригодны лишь для указанного спектрального интервала, т. к. в других интервалах возможно присутствие излучения от паров воды и CO_2 , образующихся при горении, концентрация которых может зависеть от типа горючего, его химического состава и влагосодержания [20].

На основании вышеизложенного представляет интерес исследование оптических свойств пламени в тех спектральных интервалах, где присутствуют мощные линии излучения продуктов горения. Поэтому в этих спектральных интервалах можно применять методы ИК-диагностики для определения полей температуры в пламени, а также учитывать влияние других высокотемпературных объектов на результаты измерений.

Перед проведением эксперимента по исследованию полей температуры в пламени был выполнен дополнительный эксперимент по определению излучения пламени. Производилась съемка процесса горения исследуемого материала с помощью спектрографа. Затем производилась съемка АЧТ при средней температуре в пламени. Полученные спектры сравнивались и анализировались, в результате чего было определено, что для исследования полей температуры в пламени наиболее пригодны спектральные интервалы $2,5\text{--}2,7$ и $2,64\text{--}3,25$ мкм. В представленной работе рассматриваются результаты измерений, полученные в этих спектральных интервалах.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, где источники излучения и регистрирующая аппаратура находятся на одной оптической оси.

В качестве модели АЧТ использовался излучатель АЧТ-45/100/1100 производства ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 573 до 1373 К. В качестве горючего материала рассматривались: древесина березы, дизельное топливо. Длина, высота слоя растительного горючего материала (РГМ) варьировалась, а масса была равна $m=(180\text{--}200)$ г. Учитывались влагосодержание, масса горючего материала. Масса жидкого топлива варьировалась в пределах $m=(20\text{--}50)$ г. Учитыва-

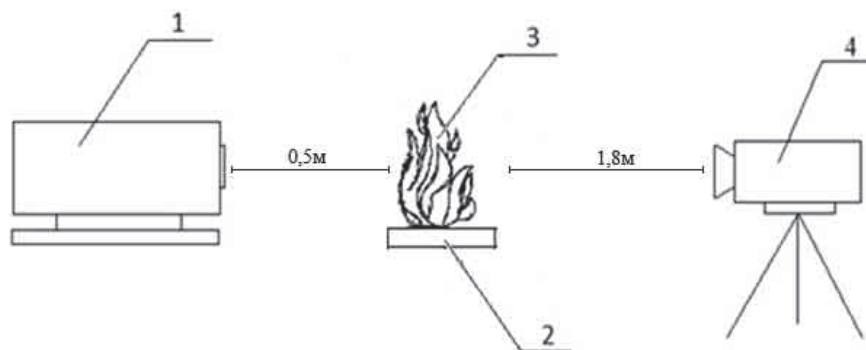


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель АЧТ-45/100/1100; 2 – слой горючих материалов (ГМ); 3 – пламя фронта горения ГМ; 4 – тепловизор JADE J530SB

Fig. 1. Experimental unit: 1 is the model black body-45/100/1100; 2 is the layer of combustible materials (CM); 3 is the flame of CM burning; 4 is the thermal observation device JADE J530SB

валась температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление. Температура воздуха варьировалась в пределах $T_e=(288-293)$ К. Относительная влажность воздуха изменялась в пределах $\varphi=(20-35)\%$, атмосферное давление $P_e=(9,94 \cdot 10^4 - 1,02 \cdot 10^5)$ Па. Дополнительно температура в пламени на оси АЧТ измерялась при помощи термопар типа ВР (вольфрам-рений) с диаметром спая 50 мкм и постоянной времени (инерционность) ε от 0,09 до 0,11 с. Для определения поля температуры был выбран спектральный интервал 2,5–2,7 мкм.

Для определения спектров изменения температуры в пламени использовали следующую методику: выбирали 20 контрольных точек (рис. 2), лежащих на одной вертикальной линии, причем интервал между ними выбирали таким образом, чтобы наиболее максимально охватить общий временной интервал процесса.

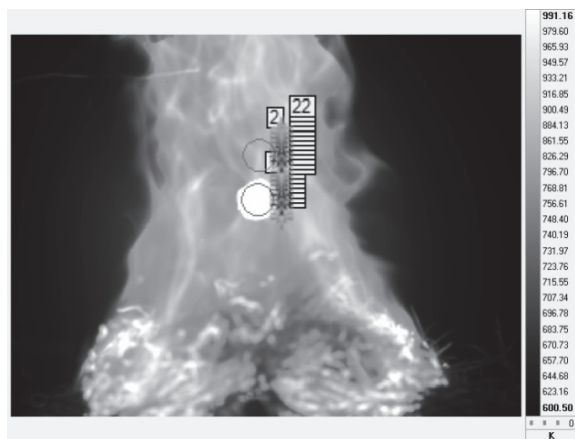


Рис. 2. Термограмма процесса горения РГМ

Fig. 2. Thermal image of vegetable combustible materials combustion

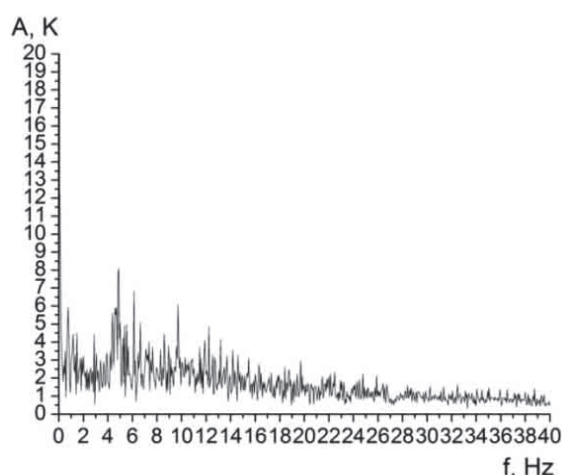


Рис. 3. Спектр изменения температуры в пламени при горении древесины березы, полученный по результатам измерений

Fig. 3. The spectrum of temperature change in the flame at birch wood combustion, obtained by measurement results

Далее получали таблицу температур для каждой контрольной точки, после, используя быстрое преобразование Фурье, получали спектры изменения температур, которые затем усреднялись для снижения шумов.

В результате обработки были получены следующие частотно-амплитудные спектры изменения температуры в пламени для различных видов ГМ.

На рис. 3 изображены спектры изменения температуры пламени при горении древесины березы.

На спектрах видно, что присутствуют выраженные колебания в диапазоне 2–7 Гц. На спектрах, полученных для других ГМ, будет иметь место аналогичная тенденция.

На рис. 4 изображены спектры изменения температуры пламени при горении дизельного топлива.

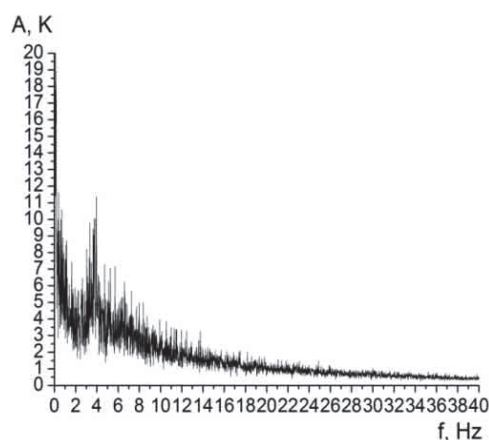


Рис. 4. Спектр изменения температуры в пламени при горении дизельного топлива, полученный по результатам измерений

Fig. 4. The spectrum of temperature change in the flame at diesel fuel combustion, obtained from measurement results

В отличие от предыдущего спектра для РГМ, в случае дизельного топлива присутствуют выраженные колебания в промежутке 4–8 Гц, причем наиболее ярко выражена частота 3–4 Гц. Все выраженные частоты обусловлены процессами, протекающими при горении. На термограмме рис. 2 видно, что в пламени присутствуют температурные неоднородности, движение которых обусловлено режимом течения в пламени и определяет пульсации температуры, обнаруживаемые в спектрах.

В результате вышеописанных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- 1) Температура в пламени многократно изменяется во времени.
- 2) В спектре температуры пламени, образующемся при горении РГМ, присутствуют характерные частотные максимумы в диапазоне от 2 до 7 Гц, для дизельного топлива – от 4 до 8 Гц.
- 3) Анализ спектров изменения температуры, полученных при регистрации пламени в разных спектральных диапазонах, приводит к заклю-

чению, что пульсации температуры в пламени связаны с режимом течения в пламени и наличием турбулентности, поскольку во всех экспериментах при горении твердых и жидких ГМ были обнаружены характерные частоты, которые находятся в интервале до 20 Гц.

Представляет интерес исследование связи этих частот с размерами температурных неоднородностей и масштабом турбулентности в пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-01-00513_a и при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МД-5754.2015.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. – М.: Гос. Энергетич. Изд-во, 1959. – 320 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
3. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
4. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – № 11. – С. 1002–1006.
5. Differentiating the Roles of IR Measurement and Simulation for Power and Temperature Aware Design / W. Huang, K. Skadron, S. Gurumurthi, R.J. Ribando, M.R. Stan // Performance Analysis of Systems and Software, 2009. ISPASS 2009. IEEE International Symposium. – Boston, Massachusetts, USA, April 26–28, 2009. – P. 1–10. DOI: 10.1109/ISPASS.2009.4919633.
6. Vavilov V.P. Thermal/Infrared Nondestructive Testing, NDT Handbook Series. – M: Spectrum Publ., 2009. – V. 5. – 467 p.
7. Measurement of the temperature profile of an exothermic autocatalytic reaction front / J. Martin, N. Rakotomalala, L. Talon, D. Salin // Physical review E 80. – 2009. – 055101@. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.055101.
8. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые методы борьбы с ними. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1992. – 407 с.
9. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф: Ч. 1. – Томск: Изд-во ТГУ, 2003. – 524 с.
10. Спектры излучения при горении лесных материалов / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.В. Рейно, Р.Ш. Цык // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение тушение и экологические последствия: Матер. Междунар. конф. – Иркутск, 2001. – С. 58–62.
11. Рейно В.В., Шерстобитов М.В. Влияние коэффициента излучения пламени и выбор спектрального диапазона при регистрации ИК-изображений очагов горения // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф: Матер. 7-й Междунар. конф. – Томск: Томский гос. ун-т, 2008. – С. 97–98.
12. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires / P. Boulet, G. Pareut, Z. Acem, A. Collin, O. Sero-Guillaume // Fire Safety Journal. – 2011. – № 46. – P. 21–26.
13. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique // Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings / Ed. by J.P. Gore. – San Antonio, TX, April 23–26, 1995. – P. 81–86.
14. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // QIRT. – 2006. URL: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (дата обращения: 04.10.2014).
15. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner / J. Dupuy, P. Vachet, J. Maréchal, J. Meléndez, A.J. de Castro // International Journal of Wildland Fire. – 2007. – № 16. – P. 324–340.
16. Tadashi Konishi, Akihiko Ito, Kozo Saito. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids // Appl. Opt. – 2000. – V. 39. – P. 4278–4283.
17. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread over Liquids / J. Meléndez, J.M. Aranda, A.J. de Castro, F. López // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2006. – V. 3. – Iss. 2. – P. 183–199.
18. Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning Fabry-Perot filter / W.T. Rawlins, W.G. Lawrence, W.J. Marinelli, M.G. Allen // 2nd Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute. – Oakland, California, March 2001. – P. 1–13.
19. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques / E. Pastor, A. Rigueiro, L. Zárate, A. Giménez, J. Arnaldos, E. Planas // Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. – Rotterdam, 2002. – P. 1–11.
20. Льюис Б., Пиз Р.Н., Тэйлор Х.С. Физические измерения в газовой динамике и при горении. Ч. II. – М.: ИЛ, 1957. – 316 с.

Поступила 24.02.2015 г.

UDC 536.462

EXPERIMENTAL STUDIES OF CHANGES IN TEMPERATURE DURING COMBUSTION OF SOME COMBUSTIBLE MATERIALS USING THE METHOD OF IR-DIAGNOSTICS IN SHORT SPECTRAL BANDS

Mikhail V. Agafontsev,

Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: kim75mva@gmail.com

Egor L. Loboda,

Dr. Sc., Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Vladimir V. Reyno,

V.E. Zuev Institute of Optics and Atmosphere SD of RAN,

1, Academician Zuev Square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: reyno@iao.ru

The relevance of the research. When simulating the combustion processes it is often necessary to determine the temperature field. Traditional methods of experimental studies of combustion processes involve the use of a large number of thermocouples to determine the temperature fields in the flame, which causes difficulties in determining the temperature. The thermocouple determines the temperature not in a specific point of the space, but in a region with radius about ten diameters of a thermocouple. When using the thermocouple method, one should consider the inertia feature and heat flow over the free ends. Modern methods of infrared diagnostics with application of thermal imaging cameras allow abandoning the use of a large number of thermocouples and obtaining the acceptable spatial resolution with high time details.

The methods used in the study: The paper deals with the experimental study of temperature change in the flame. The flame generated at combustion of different fuels was selected as the test object. The combustion was shot with a thermal imaging camera in different spectral ranges. At the same time, the temperature in the flame was controlled with a thermocouple; the emissivity was corrected by the data from the thermocouple. On the thermogram obtained the authors have selected 20 points on the same vertical axis. For each point the array of temperatures was obtained. The fast Fourier transform was applied to the array. The authors obtained the frequency-amplitude spectra of temperature change.

The results. The typical temperature surges were identified. To investigate liquid fuels the frequency maximums are ranged from 4 to 16 Hz, for vegetative combustible materials the frequency peaks were found in the range from 2 to 7 Hz.

Key words:

Temperature, flame, IR-radiation, IR-camera, IR-diagnostic.

The research was supported by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MD-5754.2015.1 and financially supported by a grant of RFBR № 15-01-00513_a.

REFERENCES

1. Spolding D.B. *Osnovy teorii gorenii* [Bases of combustion theory]. Moscow, State Power Publ., 1959. 320 p.
2. Gossorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya* [Infrared thermography]. Moscow, Mir Publ., 1988. 416 p.
3. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, ID Spektr Publ., 2009. 544 p.
4. Loboda E.L., Reyno V.V. *Vliyanie koeffitsienta izlucheniya plameni na izmerenie temperatur IK-metodami pri gorenii lesnykh i stepnykh goryuchikh materialov pri razlichnom vlagosoderzhanii. Chastotny analiz izmeneniya temperatury* [Influence of flame radiation coefficient on temperature change by IR-methods at forest and steppe fuels at different humidity. Frequency analysis of temperature change]. *Optika atmosfery i okeana*, 2011, no. 11, pp. 1002–1006.
5. Huang W., Skadron K., Gurumurthi S., Ribando R.J., Stan M.R. Differentiating the Roles of IR Measurement and Simulation for Power and Temperature Aware Design. *Performance Analysis of Systems and Software, 2009. ISPASS 2009. IEEE International Symposium*. Boston, Massachusetts, USA, April 26–28, 2009. pp. 1–10. DOI: 10.1109/ISPASS.2009.4919633.
6. Vavilov V.P. *Thermal/Infrared Nondestructive Testing, NDT Handbook Series*. Moscow, Spectrum Publ., 2009. Vol. 5, 467 p.
7. Martin J., Rakotomalala N., Talon L., Salin D. Measurement of the temperature profile of an exothermic autocatalytic reaction front. *Physical review E* 80, 2009, 055101@. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.055101.
8. Grishin A.M. *Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye metody borby s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new methods for fire-fighting]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 407 p.
9. Grishin A.M. *Modelirovanie i prognoz katastrof. Ch. 1* [Modeling and predicting disasters. P. 1]. Tomsk, TGU Press, 2003. 524 p.
10. Grishin A.M., Dolgov A.A., Reyno V.V., Tsyk R.Sh. *Spektry izlucheniya pri gorenii lesnykh materialov* [Radiation spectra at forest fires]. *Lesnye i stepnye pozhary: vzniknovenie, rasprostraneniye, tusheniye i ekologicheskie posledstviya: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Forest and steppe fires: occurrence, propagation, fighting and ecological consequences. Proc. International conference]. Irkutsk, 2001. pp. 58–62.
11. Reyno V.V., Sherstobitov M.V. *Vliyanie koeffitsienta izlucheniya plameni i vybor spektralnogo diapazona pri registratsii IK-izobrazheniy ochagov gorenii* [Influence of flame radiation coefficient and selection of spectral range at registration of IR-images of combustion source]. *Matematicheskoe modelirovanie opasnykh prirodnykh yavleniy i katastrof: Materialy 7 mezhdunarodnoy konferentsii* [Mathematical modeling of dangerous natural phenomena].

- mena and disasters. Proc. 7 International conference]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2008. pp. 97–98.
12. Boulet P., Pareut G., Acem Z., Collin A., Sero-Guillaume O. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires. *Fire Safety Journal*, 2011, no. 46, pp. 21–26.
13. Qian C., Saito K. Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique. *Combustion Fundamentals and Applications. Joint Technical Meeting. Proceedings*. Ed. by J.P. Gore. San Antonio, TX, April 23–26, 1995. pp. 81–86.
14. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels. *QIRT*, 2006. Available at: <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2006/papers/011.pdf> (accessed 04.10.2014).
15. Dupuy J., Vachet P., Maréchal J., Meléndez J., De Castro A.J. Thermal infrared emission-transmission measurements in flames from a cylindrical forest fuel burner. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, no. 16, pp. 324–340.
16. Tadashi Konishi, Akihiko Ito, Kozo Saito. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread Over Liquids. *Appl. Opt.*, 2000, vol. 39, pp. 4278–4283.
17. Meléndez J., Aranda J.M., De Castro A.J., López F. Transient Infrared Temperature Measurements of Liquid-Fuel Surfaces: Results of Studies of Flames Spread over Liquids. *Quantitative Infra-Red Thermography Journal*, 2006, vol. 3, Iss. 2, pp. 183–199.
18. Rawlins W.T., Lawrence W.G., Marinelli W.J., Allen M.G. Hyperspectral infrared imaging of flames using a spectrally scanning Fabry-Perot filter. *2nd Joint Meeting of the U.S. Sections of the Combustion Institute*. Oakland, California, March 2001. pp. 1–13.
19. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L., Giménez A., Arnaldos J., Planas E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Rotterdam, 2002. pp. 1–11.
20. Lewis B., Piz R.N., Talor H.S. *Fizicheskie izmereniya v gazovoy dinamike i pri gorenii. Ch. II* [Physical changes in gas dynamics and at combustion. P. II]. Moscow, IL Publ., 1957. 316 p.

Received: 24 February 2015.

УДК 53.072.621.317.329:53.097:538.9:51–74

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОСАЖДЕНИЯ КОНДЕНСИРУЕМОЙ ФАЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Степкина Мария Юрьевна,

аспирант, мл. науч. сотр. лаборатории физики преобразования энергии
высокоэнергетических материалов Института проблем химико-энергетических
технологий СО РАН, Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1.
E-mail: mabric@mail.ru

Кудряшова Ольга Борисовна,

д-р физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотр. лаборатории физики
преобразования энергии высокоэнергетических материалов Института
проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия, 659322,
г. Бийск, ул. Социалистическая, 1. E-mail: olgakudr@inbox.ru

Актуальность работы связана с исследованием эффективности использования электрического поля для осаждения конкретных веществ с целью очистки помещения от аэрозольных загрязнений. Развитие методов обеспечения чистоты среды и поверхности в закрытых рабочих помещениях, особенно в условиях развивающихся технологий производства, медицины и условий жизнеобеспечения человека, всегда актуальны и своевременны.

Цель работы: экспериментальное и теоретическое исследование процесса осаждения при взаимодействии электрического поля с частицами мелкодисперсных аэрозолей и разработка на основе этих исследований эффективных способов сбора различных вредных веществ из воздуха и очистки поверхности рабочих помещений.

Методы исследования: оптическая диагностика аэрозоля, основанная на методе малоуглового рассеяния с использованием лазерного измерительного комплекса ЛИД-2М и технологии лазерной дифракции (анализатор Malvern Spraytec); тензометрический метод измерения веса; эжекционный метод распыления; метод механического измельчения диспергируемых порошков.

Результаты. Показана зарядка аэрозольных частиц при возникновении коронного разряда. Проведены экспериментальные исследования распыления модельных веществ с воздействием на них электрического поля и без него. Получены результаты изменения дисперсности и массовой концентрации продуцируемого аэрозоля в ходе эксперимента с помощью лазерной измерительной установки ЛИД-2М. В результате экспериментально установлено, что скорость осаждения аэрозольных частиц при воздействии электрического поля увеличивается в несколько раз, но не для всех исследуемых веществ – так, крупные частицы аэрозоля быстрее оседают под действием гравитации. Проведен расчет характерных скоростей, возникающих в процессе эволюции аэрозоля, для модельных веществ. Представлен сравнительный анализ скоростей конвективного распространения частиц в пространстве, гравитационного осаждения и дрейфа частиц аэрозольного облака под действием электрических сил. На основе данного анализа можно установить, насколько эффективно использование электрического поля для осаждения конкретного вещества с определенной дисперсностью. Полученные расчетным путем данные следует также учитывать при проектировании новых установок электрофильтров.

Ключевые слова:

Аэрозольное облако, конденсированная фаза, коронный разряд, гравитационное осаждение, скорость дрейфа частиц, коэффициент диффузии, электростатическое поле.

Один из известных способов осаждения аэрозолей, в том числе вредных и опасных, основан на применении электрического поля. При этом эффективность воздействия электрического поля на аэрозоли различных физико-химических свойств и дисперсности может быть различна. Цель данной работы – с помощью экспериментальных исследований и теоретических расчетов характерных скоростей установить, в каких именно случаях применение электрического поля будет эффективным для осаждения аэрозолей.

Зарядка аэрозольных частиц под действием электрического поля происходит при возникновении коронного разряда между электродами (рис. 1). При этом выделяют две характерные зоны. Активная зона (зона чехла короны) предполагает активный ионизационный процесс столкновения нейтральных частиц аэрозоля с заряженными ионами, покидающими коронирующий электрод. Вторая – это пассивная зона, представляющая со-

бой все межэлектродное пространство, за исключением зоны чехла короны, в которой частицы движутся по силовым линиям и продолжают взаимодействовать с частицами воздуха. Напряженность, при которой возникает коронный разряд, называется критической [1–4]. Величина критической напряженности для отрицательной короны, учитывая конструктивные параметры используемого электрофильтра, определяется по эмпирической формуле Пика [5]:

$$E_0 = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6, \quad (1)$$

где R_1 – радиус коронирующего электрода; β – относительная плотность газов.

Отношение плотности газов в рабочих условиях к их плотности в стандартных условиях (при температуре 20 °С и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Н/м²) определяет относительную плотность газов [5]:

$$\beta = \frac{\dot{A} \pm p_i}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t},$$

где t – температура; $B \pm p_i$ – абсолютное давление газов, для воздуха $1,01325 \cdot 10^5$ Н/м².

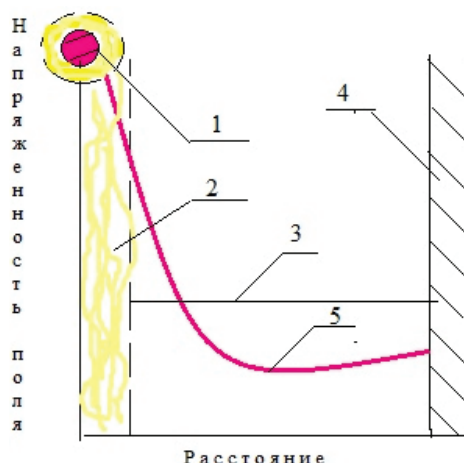


Рис. 1. Зоны короны и изменения напряженности в межэлектродном промежутке: 1) коронирующий электрод; 2) активная зона; 3) пассивная зона; 4) внешний заземленный электрод; 5) зависимость напряженности от координат

Fig. 1. Crown regions and changes in stress in interelectrode gap: 1) corona electrode; 2) active zone; 3) passive zone; 4) external ground electrode; 5) stress coordinate dependence

Экспериментальное исследование

При экспериментальном исследовании воздействия электрического поля на аэрозольную среду в качестве модельных веществ, подвергаемых диспергированию, приняты следующие: насыщенный раствор соли, мелкодисперсный порошок аэросила, тальковая пыль. Выбор данных веществ обусловлен следующим. Известно [6], что вдыхание пыли аэросила и накопление ее в легких может вызывать заболевание – силикоз. Вдыхание пыли таль-

ка в больших объемах может вызывать талькоз – доброкачественное заболевание из группы пневмокониозов. Поэтому особенно важно исследовать способы фильтрации таких веществ для сохранения здоровья человека, имеющего непосредственный контакт с подобными аэрозолями.

При проведении эксперимента по осаждению конденсированной фазы аэрозольной среды контролировались дисперсность и концентрация изучаемого аэрозоля, как во времени, так и в пространстве. Для этих целей использовали лазерную измерительную установку ЛИД-2М, разработанную в ИПХЭТ СО РАН [7, 8].

В качестве устройства для создания электрического поля использовался электрофильтр, внутреннее устройство которого показано на рис. 2 [9].

В качестве устройств диспергирования выбран краскопульт для распыления насыщенного раствора соли и пескоструй для распыления твердофазных веществ.

Полный лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований приведен на рис. 3.

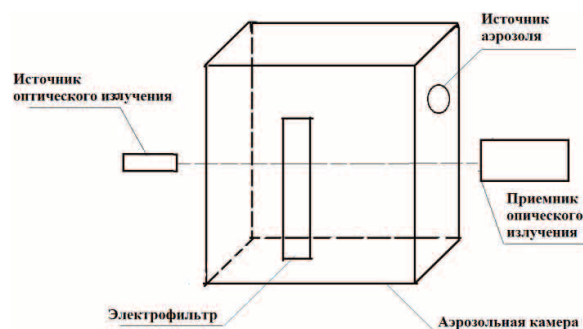


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

Fig. 3. Test bench diagram

Первая серия экспериментов проводится при нормальных условиях, без каких-либо внешних воздействий, после чего проводятся эксперименты с использованием электрофильтра.

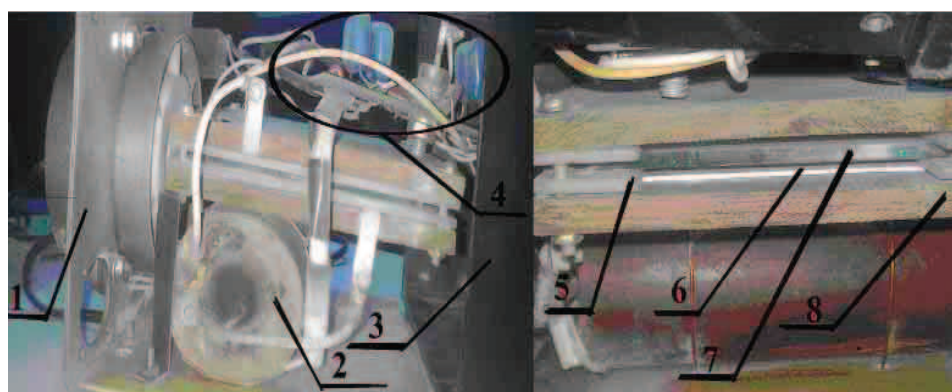


Рис. 2. Внутреннее устройство используемого в эксперименте электрофильтра: 1) вентилятор; 2) автомобильная катушка; 3) корпус прибора; 4) схема регулировки; 5) пластмассовые клеммы; 6) металлические электроды; 7) стеклянная пластина; 8) активная зона

Fig. 2. Internal design of the electrical filter used in the experiment: 1) fan; 2) vehicle coil; 3) device body; 4) adjustment scheme; 5) plastic terminals; 6) metal electrodes; 7) glass plate; 8) active zone

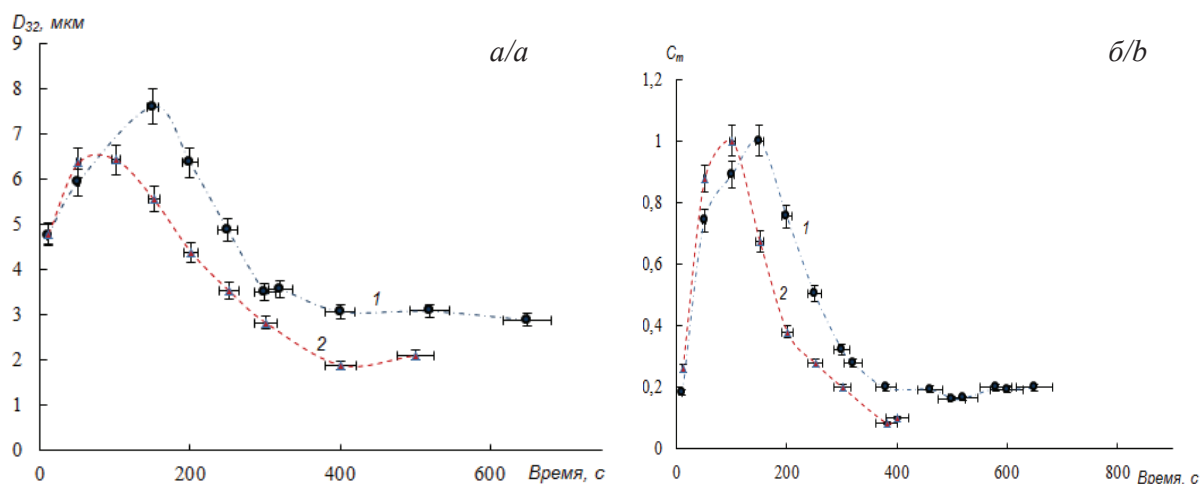


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц аэрозоля C_m (б) от времени для насыщенного раствора соли: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 4. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (a) and relative concentration of C_m (b) aerosol particles on time for saturated salt solution: 1) without; 2) with electric field

Время распыления насыщенного раствора соли массой 10 г составило 35 с. На второй минуте после распыления насыщенного раствора соли, когда в воздушной среде остались преимущественно частички соли (вода испарилась), включается электрофильтр. Время воздействия электрофильтра на аэрозоль составило 7 мин. Результаты экспериментальных измерений на установке ЛИД-2М для насыщенного раствора соли представлены на рис. 4.

Масса мелкодисперсного порошка аэрозоля составила 3 г, время распыления – 20 с. При проведении экспериментов с воздействием электрофильтра, который был включен сразу после момента распыления аэрозоля, время его работы составило 5 минут. Изменение среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} и относительной концентрации C_m в процессе эксперимента при воздействии и без влияния электрофильтра для аэрозоля представлено на рис. 5.

Как показано на рис. 5, б относительная концентрация аэрозоля на первых минутах эксперимента с воздействием электрофильтра и без него незначительно отличаются, но аэрозольные частицы дольше задерживаются в среде, в то время как осаждаются эти частицы под действием гравитации уже при $t > 1000$ с [10].

В экспериментах при распылении присыпки из талька массой 3 г за 10 с электрофильтр был включен через 40 с после распыления на 7 минут. Результаты эксперимента представлены на рис. 6 [11].

Как следует из проведенных экспериментов, электрическое поле быстрее осаждаёт частицы меньших размеров (солевой раствор, отчасти тальк), а более крупные частицы (аэросил) осаждаются под действием гравитации. Чтобы оценить влияние различных процессов на динамику частиц аэрозоля под действием электрического поля, проведем расчеты характерных скоростей этих процессов.

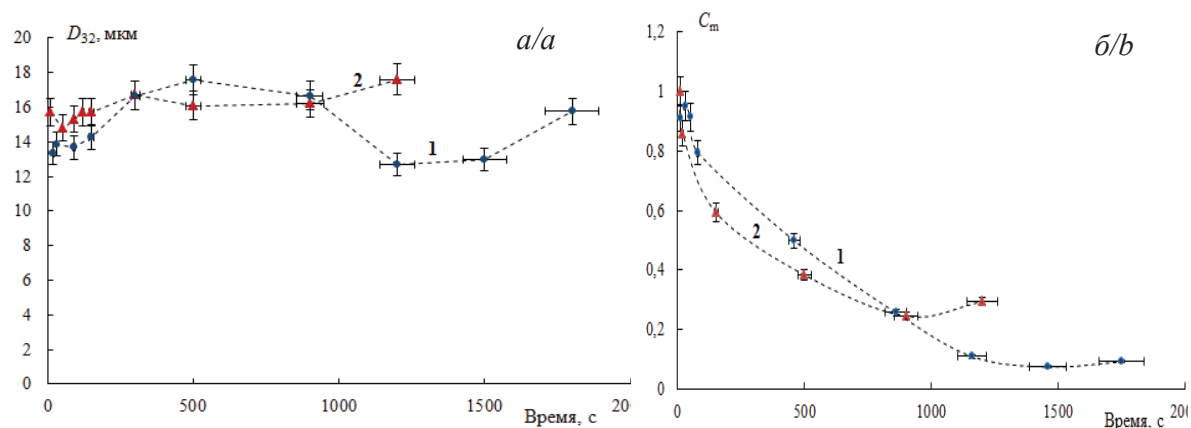


Рис. 5. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц C_m (б) от времени для аэрозоля: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 5. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (a) and relative concentration of C_m aerosol particles (b) on time for aerosil: 1) without; 2) with electric field

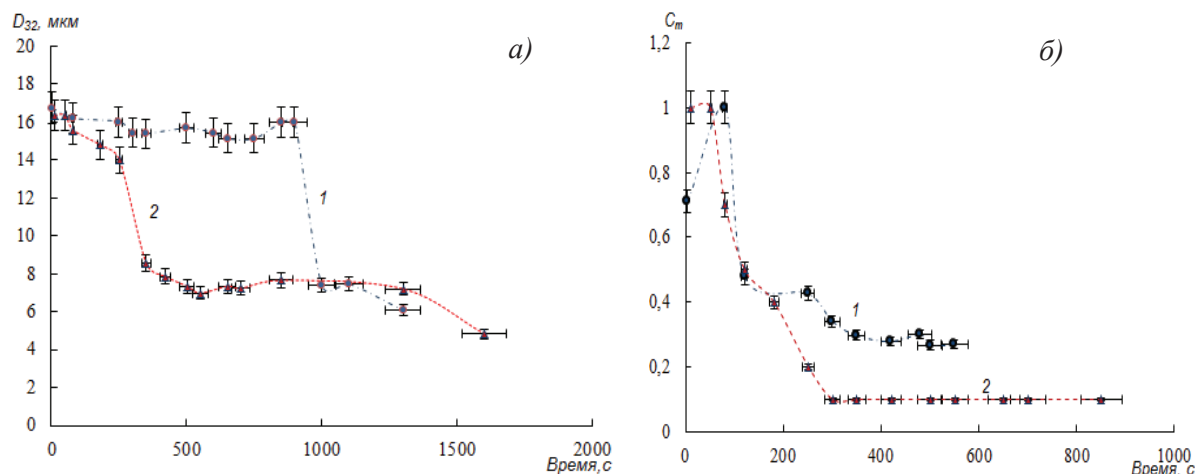


Рис. 6. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра D_{32} (а) и относительной концентрации частиц C_m (б) от времени для тальковой пудры: 1) без воздействий; 2) при воздействии электрического поля

Fig. 6. Dependence of average space-volumetric diameter D_{32} (a) and relative concentration of C_m aerosol particles (b) on time for talk powder: 1) without; 2) with electric field

Теоретические расчеты

Эволюция аэрозольного облака происходит за счет дрейфа частиц под действием электрических сил, а также за счет гравитационного осаждения частиц и конвективной диффузии. Какой механизм воздействия на конкретное вещество определенной дисперсности является ведущим, предстоит выявить с помощью математических соотношений.

Целесообразно начать с простейшего случая – равномерного движения частиц под действием гравитационной силы. Наиболее изучено как теоретически, так и экспериментально движение шарообразных частиц.

Стационарная скорость оседания частиц выражается формулой Стокса [12]:

$$V_0 = -\frac{2r^2g(\rho - \rho_g)}{9\mu_g}, \quad (2)$$

где μ_g – коэффициент динамической вязкости газа; r – радиус частицы; V_0 – скорость оседания частиц; g – ускорение свободного падения; ρ , ρ_g – плотности частицы и среды соответственно.

Движение аэрозольных частиц, находящихся в униполярной ионной атмосфере при отсутствии внешнего электрического поля, во многом определяется диффузией ионов. Для оценки времени диффузионного распространения частиц в пространстве необходимо решить задачу о диффузии аэрозоля и экспериментально определить коэффициент диффузии. Коэффициент броуновской диффузии взвешенных в воздухе частиц определяется соотношением Эйнштейна–Смолуховского, формула [13, 14]:

$$D_b = \frac{kT}{6\pi\mu_g r}, \quad (3)$$

где $k=1,384 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Однако на практике броуновским движением самих частиц при распространении аэрозольного облака пренебрегают, так для частиц радиусом $r_p \approx 10$ мкм коэффициент броуновской диффузии, согласно (3), имеет порядок $D_b \sim 10^{-12}$ м²/с. При этом значении коэффициента диффузии за время порядка нескольких часов аэрозольное облако не распространилось бы заметно от источника, что противоречит результатам измерений. Следовательно, преобладающим механизмом распространения облака является конвективная диффузия. В результате экспериментальных исследований для частиц водного аэрозоля с диаметром порядка нескольких микрон установлено, что величина коэффициента диффузии составляет $D=0,0016$ м²/с, что более чем в ~ 1000000 раз превышает коэффициент броуновской диффузии. Коэффициент диффузии зависит, прежде всего, от размеров частиц, поэтому в расчетах для аэрозоля с той же дисперсностью можно принимать значение коэффициента диффузии, равное $0,0016$ м²/с. Среднюю скорость диффузии можно рассчитать, используя формулу:

$$\bar{u}_b = \frac{12D}{H}, \quad (4)$$

где D – значение коэффициента конвективной диффузии; H – расстояние, пройденное частицей в результате диффузии (в нашем случае $H=1$ м). Значение средней скорости диффузии $u_d=0,0192$ м/с.

Зависимости скорости оседания от радиуса для модельных веществ, рассчитанные по формуле (2), представлены на рис. 7. В последующих расчетах скоростей диапазон значений размеров частиц соответствует экспериментальным данным, приведенным на рис. 4–6 [12].

Зависимости скоростей диффузии от радиуса для модельных веществ, рассчитанные по формуле (4), представлены на рис. 8.

Следующим механизмом распространения в пространстве диспергируемых частиц является

электрическое поле. Характер распределения аэрозольных частиц под действием электрических полей вдоль осадительного электрода представлен на рис. 9.

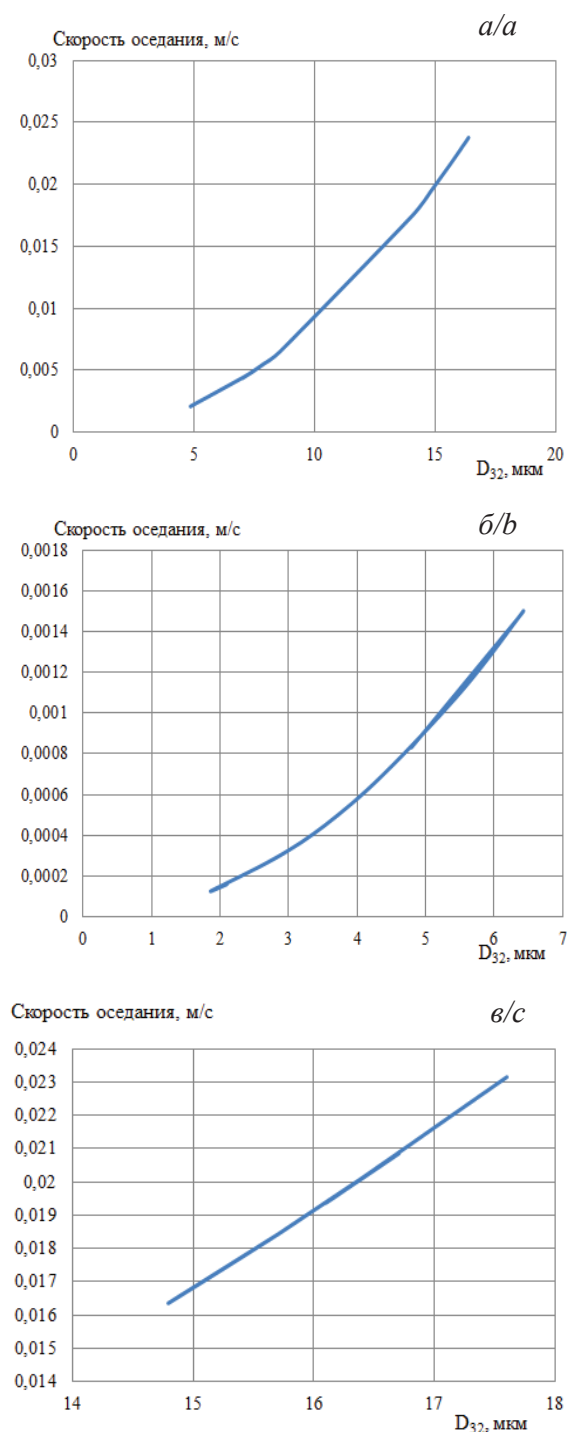


Рис. 7. Зависимость скорости гравитационного осаждения частиц от диаметра частиц распыляемого порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 7. Dependence of speed of particle gravitation sedimentation on diameter of particles of pulverizable powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

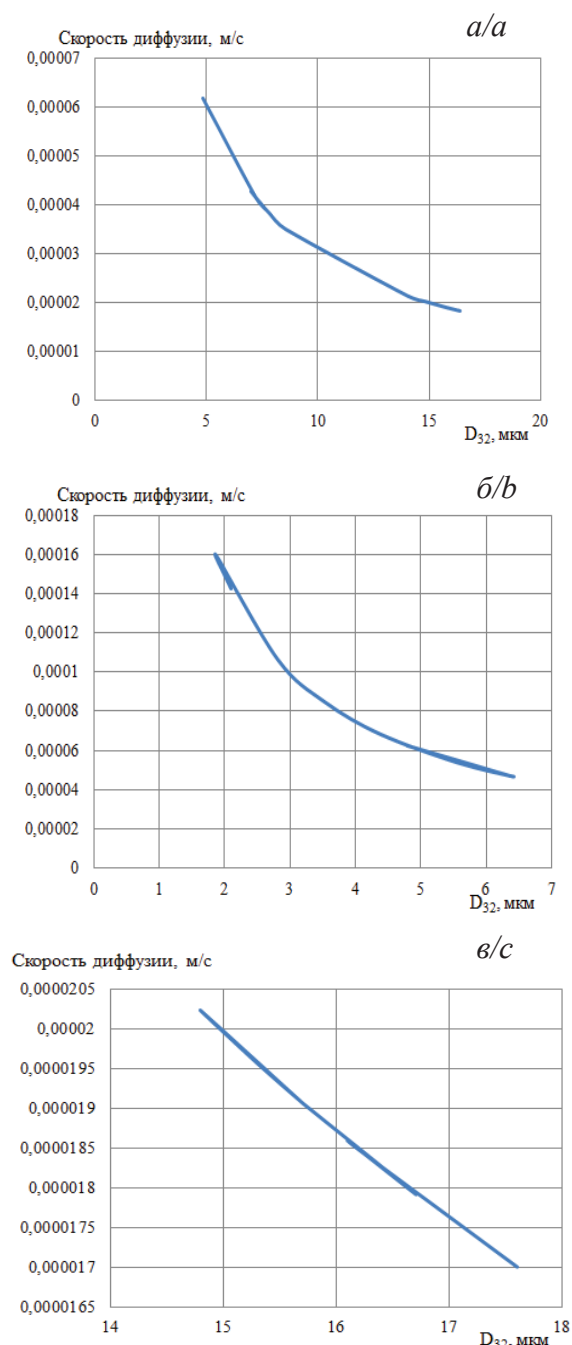


Рис. 8. Зависимость скорости диффузии частиц от диаметра частиц распыляемого порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 8. Dependence of particle diffusion rate on diameter of particles of pulverizable powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

Как видно из рис. 9, в процессе заряджения отрицательные ионы и свободные электроны при контакте с частицей заряжают её отрицательно, при этом электроны уходят в частицу [15–18].

Перед расчетом скорости дрейфа, с которой частицы, получившие заряд, будут распространяться в измерительном объеме, необходимо учиты-

вать параметры конкретного используемого электрофильтра (таблица).

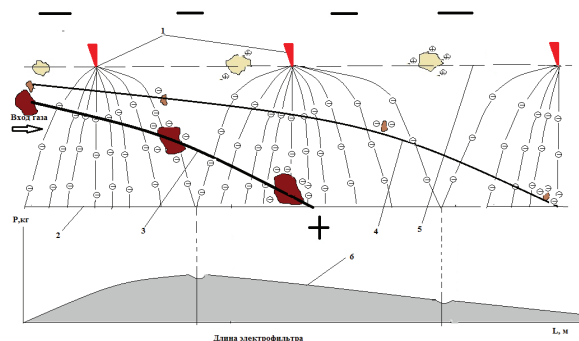


Рис. 9. Упрощенная схема зарядки и осаждения частиц пыли в электрофильтре: 1) коронирующие элементы; 2) осадительный электрод; 3–4) траектория движения крупной (3) и мелкой (4) отрицательно заряженных частиц пыли; 5) траектория положительно заряженной частицы; 6) характер распределения пыли (P , кг) по длине осадительного электрода (L /м)

Fig. 9. Simplified diagram of charge and sedimentation of dust particles in electrical filter: 1) corona elements; 2) precipitation electrode; 3, 4) path of a large (3) and small (4) negatively charged dust particles; 5) path of a positively charged particle; 6) mode of dust distribution (P , kg) over the precipitation electrode length (L /m)

Таблица. Конструктивные параметры электрофильтра, используемого в экспериментах

Table. Design values of the electric filter applied in the experiments

Параметр Parameter	Значение Values
Площадь осаждения S , мм ² Sedimentation area, S , mm ²	1000
Длина коронирующего элемента, длина активной зоны l , м Length of the corona element, active zone length l , m	0,085
Расстояние между коронирующими электродами d , м Distance between the corona electrodes d , m	0,01
Расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов H , м Distance between the planes of precipitation and corona electrodes, H , m	0,005
Динамическая вязкость воздуха μ , *10 ⁻⁶ Па*с Dynamic air viscosity μ , *10 ⁻⁶ Pa*s	17,2
Средняя длина пути свободного пробега молекулы, для газов λ , м Average length of a molecule free path, for gases λ , m	10 ⁻⁷
Напряжение (среднее значение) U , В Voltage (average value) U , V	8000
Радиус коронирующего электрода R_1 , м Corona electrode radius R_1 , m	0,004

Одним из расчетных параметров является критическое напряжение, которое можно определить, предварительно рассчитав критическую напряженность E_0 по формуле (1), используя выражение [5]:

$$U_0 = E_0 R_1 \left(\frac{\pi H_1}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right),$$

где H_1 – расстояние между осадительным и коронирующим электродом; d – расстояние между коронирующими электродами.

Линейная плотность тока короны (мА/м) будет определяться выражением [5]:

$$i_0 = \frac{4\pi^2 k v}{9 \cdot 10^9 d^2 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right)} U(U - U_0),$$

где v – коэффициент, зависящий от расположения электродов H/d ; U – напряжение (среднее значение); $k=2,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$.

Напряженность электрического поля (В/м) составит:

$$E = \sqrt{\frac{8i_0 H}{4\pi \epsilon_0 k d}},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная распыляемого вещества.

Тогда скорость дрейфа частиц диаметром от 2 до 50 мкм определяется по формуле:

$$\omega = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E^2}{\mu_g} r. \quad (5)$$

А для частиц диаметром от 0,1 до 2 мкм – по формуле:

$$\omega = \omega + \left(1 + A \frac{\lambda}{r} \right), \quad (6)$$

где $A = 0,815 \dots 1,63$; λ – средняя длина свободного пробега молекулы для газов $\lambda=10^{-7}$ [5, 19].

На рис. 10 представлены зависимости рассчитанной по формулам (5), (6) скорости дрейфа от размера частиц D_{32} .

Из рис. 11–13 видно, что наибольшие значения имеет скорость дрейфа для талька (0,04–0,12 м/с) и для раствора соли (0,02–0,07 м/с), а скорость оседания для этих веществ имеет наименьшие значения (менее 0,025 м/с для талька, менее 0,0016 м/с для раствора соли). Для крупных частиц аэросила картина обратная: значительной является скорость оседания (от 0,015 до 0,025 м/с), а наименьшие значения имеет скорость дрейфа (0,005 м/с). Следовательно, эффективным является использования электрофильтра для частиц с диаметром менее 15 мкм (порошок талька и раствора соли), а аэросил быстрее осядет под действием гравитации, чем при воздействии электрического поля [20].

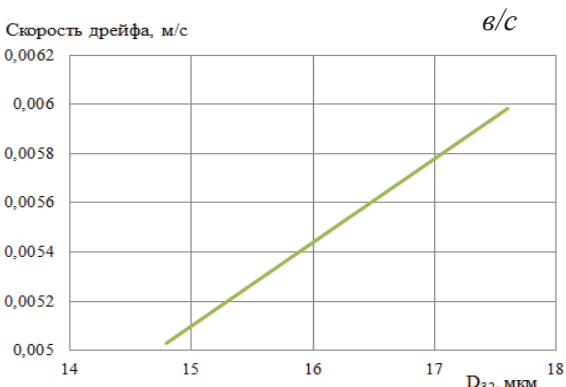
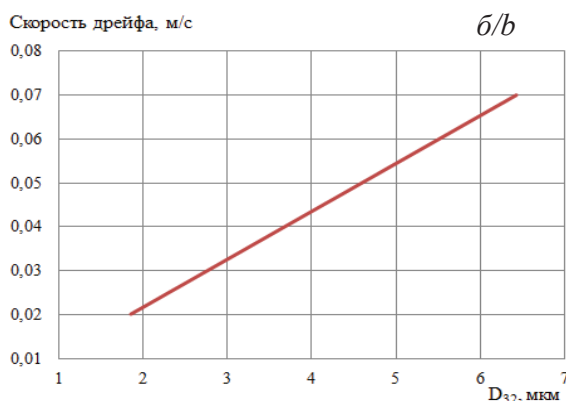
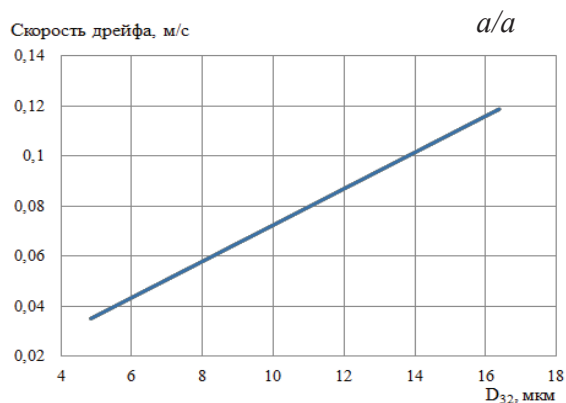


Рис. 10. Зависимость рассчитанной скорости дрейфа частиц от диаметра D_{32} для порошка талька (а), раствора соли (б), аэросила (в)

Fig. 10. Dependence of the calculated particle drift velocity on diameter D_{32} for the powder of talk (a), salt solution (b), aerosil (c)

На следующих рисунках совмещены рассчитанные скорости гравитационного оседания, диффузии, дрейфа для частиц порошка талька (рис. 11), аэросила (рис. 12) и раствора соли (рис. 13).

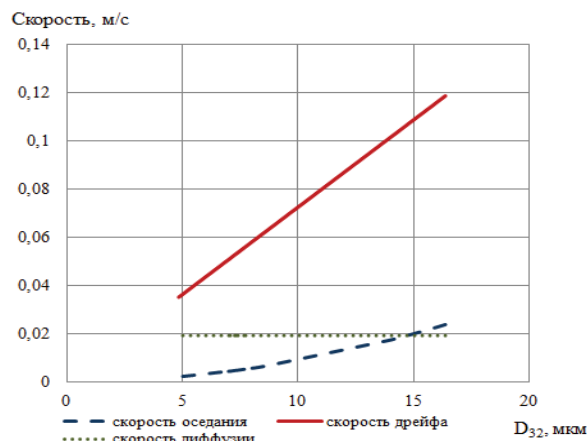


Рис. 11. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для порошка талька

Fig. 11. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for talk powder

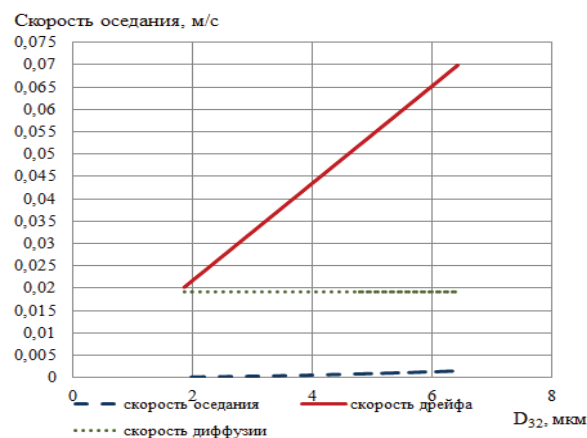


Рис. 12. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для раствора соли

Fig. 12. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for salt solution

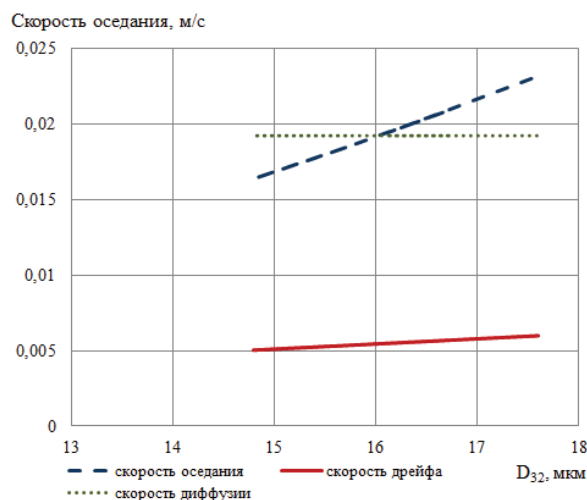


Рис. 13. Зависимость скоростей движения частиц от диаметра D_{32} для аэросила

Fig. 13. Dependence of particle motion velocity on diameter D_{32} for aerosil

Заключение

В статье рассмотрены основные принципы зарядки аэрозольных частиц под действием электрического поля; установлено, что большинство аэрозольных частиц получают отрицательный электрический заряд в поле коронного разряда. Коронный разряд характеризуется значением критической напряженности, которая в свою очередь зависит от параметров используемого электрофильтра и относительной плотности газов.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась лазерная измерительная установка на основе метода малоуглового рассеяния, позволяющая фиксировать динамику изменения аэрозольного облака по дисперсности и концентрации в объеме измерительной камеры. С помощью этой установки получены данные эксперимента, позволяющие оценить дисперсионный состав и убыль массовой концентрации в ходе опыта для модельных веществ: насыщенного водного раствора соли, порошка талька и аэросила. Определено, что влияние электрического поля значительно увеличивает время, при котором массовая концентрация аэрозольного облака в измерительном объеме стремится к нулю, для частиц соли и талька (рис. 4, 6). Напротив, воздействие электрического поля на частицы аэросил с диаметром боль-

ше 15 мкм заставляет частицы дольше парить в воздухе, в то время как при гравитационной седиментации аэросил осел уже на 1000 с (рис. 5).

Для тех же модельных веществ был проведен расчет скоростей гравитационного оседания, диффузионного распространения и скорости дрейфа под действием электрического поля. При расчете скорости дрейфа необходимо учитывать параметры используемого в эксперименте электрофильтра (таблица). Как видно из полученных графиков (рис. 11–13), ведущим механизмом осаждения для частиц талька и раствора соли является скорость дрейфа частиц под действием электрического поля, а для более крупных частиц аэросила гравитационная и диффузионная скорость оказались выше, чем скорость дрейфа при воздействии электрофильтра (рис. 13). Данный вывод полностью подтвержден проведенными экспериментами (рис. 4–6). Таким образом, предложенная математическая модель процесса является адекватной, и расчеты на ее основе позволяют заранее определить эффективность использования электрофильтра для осаждения выбранного аэрозоля. Это дает возможность существенно упростить выбор параметров электрофильтра при планировании его использования для улавливания веществ в производственных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Modeling and Validation of Nanoparticle Charging Efficiency of a Single-Wire Corona Unipolar Charger / Chih-Liang Chien, Chuen-Jinn Tsai, Hui-Lin Chen, Guan-Yu Lin, Jong-Shinn Wu // *Aerosol Science and Technology*. – 2011. – № 45. – P. 1468–1479.
2. Penetration of Monodisperse, Singly Charged Nanoparticles through Polydisperse Fibrous Filters / A. Podgorski, A. Maiber, W.W. Szymanski, A. Jackiewicz, L. Gradon // *Aerosol Science and Technology*. – 2011. – № 45. – P. 215–233.
3. Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. – Семипалатинск: Кондор-Эко, 2009. – 163 с.
4. Уайт П. Высокоэффективная очистка воздуха. – М.: АТОМИЗДАТ, 1967. – 311 с.
5. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. – М.: Химия, 1967. – 344 с.
6. Архипов В.А. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность. – Томск: ГТПУ, 2007. – 136 с.
7. Ахмадеев И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2008. – 98 с.
8. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes / O. Kudryashova, A. Pavlenko, B. Vorozhtsov, S. Titov, V. Arkhipov, S. Bondarchuk, E. Maksimenko, I. Akhmadeev, E. Muravlev // *Photodetectors*. – 2012. – № 15. – P. 341–364.
9. A method for measurement of disperse composition and concentration of aerosol particles / O.B. Kudryashova, I.R. Akhmadeev, A.A. Pavlenko, V.A. Arkhipov, S.S. Bondarchuk // *Proceedings of ISMT-2009*. – Saint-Petersburg, Russia, 2009. – P. 178–183.
10. Степкина М.Ю., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И. Экспериментальное исследование способа ускорения осаждения мелкодисперсного аэрозольного облака под действием электрического поля // *Ползуновский вестник*. – 2014. – № 3. – С. 134–138.
11. Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б. Экспериментальные исследования воздействия электрического поля на микро- и наночастицы аэрозоля // *HEMs-2014: Тезисы X Междунар. конф.* – Бийск, 2014. – С. 169.
12. Степкина М.Ю. Исследование влияния физических свойств распыляемого вещества на динамику седиментации и электростатического осаждения частиц продуцируемого аэрозоля с учетом его дисперсности // *Аэрозоли Сибири: Сб. тезисов докладов XX Рабочей группы*. – Томск, 2013. – С. 109.
13. Беренев С.А. Физика атмосферных аэрозолей. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 227 с.
14. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Академия наук СССР, 1955. – 353 с.
15. Panich Intra, Artit Yawootti, Nakorn Tippayawong. Evaluation of a unipolar diffusion and field charger of aerosol particles by a corona discharge // *Particulate Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 621–631.
16. Chaolong Qi, Pramod Kulkarni. Miniature dual-corona ionizer for bipolar charging of aerosol // *Aerosol Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 81–92.
17. Deposition of charged aerosol particles on a substrate by collimating through an electric field assisted coaxial flow nozzle / Jaehong Park, Jimin Jeong, Chul Kim, Jungho Hwang // *Aerosol Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 512–519.
18. Review of spark discharge generators for production of nanoparticle aerosols / B.O. Mueller, M.E. Messing, D.L.J. Engberg, A.M. Jansson, L.I.M. Johansson, S.M. Norlen, N. Tureson, K. Deppert // *Aerosol Science and Technology*. – 2012. – № 46. – P. 1256–1270.
19. Островский Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.
20. Моделирование процессов осаждения конденсируемой фазы под действием электрического поля / М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, Е.В. Муравлев // *Аэрозоли Сибири: Сб. тезисов докладов XXI Рабочей группы*. – Томск, 2014. – С. 30.

Поступила 16.02.2015 г.

UDC 53.072.621.317.329:53.097:538.9:51–74

CONTROL OF CONDENSED PHASE SEDIMENTATION USING THE ELECTRIC FIELD

Mariya Yu. Stepkina,

Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Socialisticheskaya street, Biysk, 659322, Russia. E-mail: mabric@mail.ru

Olga B. Kudryashova,

Dr. Sc., Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Socialisticheskaya street, Biysk, 659322, Russia. E-mail: olgakudr@inbox.ru

Relevance of the work is related to the research of efficiency of using electric field for sedimentation of concrete substances to clean the room of aerosol pollution. Development of methods of ensuring purity of the environment and surface in closed working rooms, especially in the conditions of the developing production technologies, medicine and conditions of a person life support, are always actual and timely.

The aim of the research is pilot and theoretical study of sedimentation at electric field interaction with particles of fine aerosols; based on the research to develop the effective ways of collecting various harmful substances from air and cleaning working room surface.

Research methods: the optical diagnostics of an aerosol based on a method of low-angle dispersion with use of the laser measuring LID-2M complex and technology of laser diffraction (Malvern Spraytec analyzer); the tensometric method of weight measurement; the ejector dispersion method; the method of mechanical crushing of the dispersed powders.

Results. The paper demonstrates the charge of aerosol particles at crown category. The authors have carried out the pilot studies of the model substances dispersion affected by the electric field and without it. The values of change in dispersion and mass concentration of the produced aerosol were obtained during the experiment by means of the laser LID-2M measuring machine. It was experimentally determined that the speed of aerosol particles sedimentation affected by the electric field increases several times, but not for all studied substances, large particles of aero force will quicker settle under gravitation. The authors calculated the characteristic speeds arising in the course of aerosol evolution for model substances. The paper introduces the comparative analysis of speeds of particle convective distribution in space, gravitational sedimentation and drift of aerosol cloud particles under electric forces. Based on the analysis it is possible to establish the effectiveness of using the electric field for sedimentation of concrete substance with certain dispersion. The data obtained should be considered as well when designing new installations of electric precipitators.

Key words:

Aerosol cloud, condensed phase, crown category, gravitational sedimentation, speed of particle drift, diffusion coefficient, electrostatic field.

REFERENCES

- Chih-Liang Chien, Chuen-Jinn Tsai, Hui-Lin Chen, Guan-Yu Lin, Jong-Shinn Wu. Modeling and Validation of Nanoparticle Charging Efficiency of a Single-Wire Corona Unipolar Charger. *Aerosol Science and Technology*, 2011, no. 45. pp. 1468–1479.
- Podgorski A., Maiber A., Szymanski W.W., Jackiewicz A., Graddon L. Penetration of Monodisperse, Singly Charged Nanoparticles through Polydisperse Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*, 2011, no. 45. pp. 215–233.
- Sanaev Yu.I. *Obespylivanie gazov elektrofiltromi* [Dust removal of gases with electric precipitators]. Semibratovo, Kondor-Eko Publ., 2009. 163 p.
- White P. *Vysokoefektivnaya ochestka vozdukh* [Highly effective air purification]. Moscow, ATOMIZDAT Publ., 1967, 311 p.
- Uzhov V.N. *Ochestka promyshlennykh gazov elektrofiltromi* [Purification of industrial gases with electric precipitators]. Moscow, Khimiya Publ., 1967, 344 p.
- Arkhipov V.A. *Aerosolnye sistemy i ikh vliyanie na zhiznideyatelnost* [Aerosol systems and their influence on activity]. Tomsk, TGPU Press, 2007. 136 p.
- Akhmadeev I.R. *Metod i bystrodeystvuyushchaya lazernaya ustanovka dlya issledovaniya genezisa tekhnogennogo aerosolya po rasseyaniyu luch* [Method and the high-speed laser machine for researching the genesis of a technogenic aerosol on a beam dispersion in controlled volume. Cand. Diss.] Barnaul, 2008, 98 p.
- Kudryashova O., Pavlenko A., Vorozhtsov B., Titov S., Arkhipov V., Bondarchuk S., Maksimenko E., Akhmadeev I., Muravlev E. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. *Photodetectors*, 2012, no. 15. pp. 341–364.
- Kudryashova O.B., Akhmadeev I.R., Pavlenko A.A., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S. A method for measurement of disperse composition and concentration of aerosol particles. *Proceedings of ISMTII-2009*. Saint-Petersburg, Russia, 2009. pp. 178–183.
- Stepkina M.Yu., Akhmadeev I.R., Vorozhtsov B.I. *Experimentalnoe issledovanie sposoba uskoreniya osazhdeniya melkodispersnogo aerosolnogo oblaka pod deystviem elektricheskogo polya* [Pilot study of a way of acceleration of fine aerosol cloud sedimentation under the influence of electric field]. *Polzunovskiy Vestnik*, 2014, no. 3, pp. 134–138.
- Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B. *Experimentalnye issledovaniya vozdeystviya elektricheskogo polya na micro- i nanochastitsy aerosolya* [Pilot studies of electric field influence on aerosol micro- and nanoparticles]. *HEMs-2014. Vysokoenergeticheskie materialy: demilitarizatsiya, antiterrorizm i grazhdanskoe primeneniye* [High-energy materials: demilitarization, anti-terrorism and civil application]. Biysk, 2014. pp. 169.
- Stepkina M.Yu. *Issledovaniya vliyaniya fizicheskikh svoystv raspylaemogo veshchestva na dinamiku sedimentatsii i elektrostatischekogo osazhdeniya chastitsy produksirovannogo aerosolya s uchetom ego dispersnosti* [Research of influence of the sprayed substance physical properties on dynamics of sedimentation and electrostatic sedimentation of particles of the produced aerosol taking into account its dispersion]. *Aerosoli Sibiri. Proc.* [Aerosols of Siberia]. Tomsk, 2013. pp. 109.

13. Bersnev S.A. *Fizika atmosferykh aerolei* [Physics of atmospheric aerosols]. Ekaterinburg, Ural University Press, 2008. 227 p.
14. Fuks N.A. *Mekhanika aerolei* [Mechanics of aerosols]. Moscow, USSR Academy of sciences Press, 1955. 353 p.
15. Panich Intra, Artit Yawootti, Nakorn Tippayawong. Evaluation of a unipolar diffusion and field charger of aerosol particles by a corona discharge. *Particulate Science and Technology*, 2013, no. 47. pp. 621–631.
16. Chaolong Qi, Pramod Kulkarni. Miniature dual-corona ionizer for bipolar charging of aerosol. *Aerosol Science and Technology*, 2013, no. 47. pp. 81–92.
17. Jaehong Park, Jimin Jeong, Chul Kim, Jungho Hwang. Deposition of charged aerosol particles on a substrate by collimating through an electric field assisted coaxial flow nozzle. *Aerosol Science and Technology*, 2013, no. 47. pp. 512–519.
18. Meuller B.O., Messing M.E., Engberg D.L.J., Jansson A.M., Johansson L.I.M., Norlen S.M., Tureson N., Deppert K. Review of spark discharge generators for production of nanoparticle aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 2012, no. 46. pp. 1256–1270.
19. Ostrovskiy G.M. *Novy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsepy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy* [New reference book of the chemist and technologist. Processes and devices of chemical technologies]. Saint-Petersburg, Professional Publ., 2006. P. II, 916 p.
20. Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B., Korovina N.V., Myravlev E.V. Modelirovanie protsessov osazhdeniya kondensiruemoy fazy pod deystviem elektricheskogo polya [Modeling of the condensed phase sedimentation under the influence of electric field]. *Тезисы Аэрозоли Сибири* [Aerosols of Siberia]. Tomsk, 2014. p. 30.

Received: 16 February 2015.

УДК 62–121; 621.01

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО НЕАССУРОВА МЕХАНИЗМА

Яскевич Олег Михайлович,

аспирант каф. теории и основ конструирования машин Сибирского
государственного индустриального университета, Россия, 654007,
г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: Yaskevich_omm@mail.ru

Дворников Леонид Трофимович,

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой теории и основ конструирования
машин Сибирского государственного индустриального университета,
Россия, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: tmmiok@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследовать новые механизмы, которые отличаются по своей структуре от Ассуровых, для их последующего использования в практике машиностроения.

Цель работы: обоснование и отработка универсального метода исследования механизмов вне зависимости от их структуры, а также звена, принятого за неподвижное, на примере кинематического исследования нового запатентованного неассурова механизма; определение тензоров перехода для используемых в этом механизме кинематических пар; получение графических зависимостей относительного расположения звеньев по отношению к входному звену.

Методы исследования: аналитический метод преобразования однородных координат, также известный как метод винтовых аффиноров. Углы Эйлера использовались для определения относительных угловых перемещений звеньев.

Результаты. Составлен алгоритм исследования механизмов, в том числе и неассуровых. Определены тензоры преобразования одноподвижной вращательной кинематической пары V класса, двухподвижной пары IV класса, реализованной на основе гидроцилиндра и поршня, и трехподвижного сферического шарнира III класса. Получены графические зависимости всех неизвестных переменных, определяющих относительное расположение звеньев исследуемого механизма в пространстве.

Выводы. Обоснован и отработан универсальный метод исследования механизмов вне зависимости от их структуры; если механизм синтезируется на основе замкнутой цепи Грюблера, и его кинематика решается рассмотренным методом, то в результате будут получены универсальные данные об относительном расположении звеньев для группы аналогичных механизмов, отличающихся звеном, принятым в качестве стойки; алгоритм создания тензора перехода от одной системы координат к другой приведен в статье неоднократно, аналогичный подход позволяет аналитически описать любое, не рассмотренное в статье, сочленение двух смежных звеньев.

Практическое применение. При работе штанговых насосов станков-качалок в установках механизированной добычи нефти насос использует возвратно-поступательное движение, приводимое штангой станка-качалки. Если привести в движение пространственный четырехзвенный механизм при помощи коромысла, то будет обеспечено возвратно-поступательное перемещение выходного звена (поршня). Такая схема может использоваться в качестве аналога станков-качалок в установках механизированной добычи нефти.

Ключевые слова:

Новый несуров механизм, аналитический метод, тензоры преобразования кинематических пар, относительное расположение звеньев, станок-качалка, штанговый насос, самоустанавливающийся механизм.

На современном уровне развития техники и технологий, несмотря на обилие теоретически описанных и применяющихся на производстве механизмов, появляется необходимость в совершенствовании имеющихся и разработке новых простых и дешевых технических решений. При этом значительное количество как пространственных, так и плоских кинематических цепей, остаются не исследованными.

При изучении кинематики механизмов, звенья которых имеют относительные движения в одной плоскости или в параллельных плоскостях, широкое применение имеют графический и графоаналитический методы (метод кинематических диаграмм и метод планов скоростей и ускорений). Эти методы практически неприемлемы для исследования пространственных механизмов, где звенья могут иметь сколь угодно сложные относительные движения в полном декартовом пространстве. Задача кинематического исследования существенно

усложняется, если исследуемые пространственные механизмы оказываются неассуровыми. Под неассуровым [1–8] понимается такой механизм, в котором входное звено соединяется с неподвижным (со стойкой) в неподвижную кинематическую пару. При этом общая структура таких механизмов реализуется присоединением к ведущему звену цепи, отличающихся от групп нулевой подвижности, т. е. от групп Ассура, для которых подвижность группы W_r равняется нулю. Присоединяемые к ведущему звену цепи неассуровых механизмов оказываются цепями отрицательной подвижности, а именно $W_r = -1$, если на входе применяется двухподвижная пара, $W_r = -2$ при использовании трехподвижной пары, $W_r = -3$ при четырехподвижной входной паре и $W_r = -4$ при пятиподвижной входной паре.

Особенностью таких структур является то обстоятельство, что входным звеньям задается единственное определенное движение, а остальные по-

движности они приобретают в процессе взаимодействия с другими звеньями цепи. Неассуровы механизмы при кинематическом их исследовании могут рассматриваться лишь как неразделимые цепи. В этой статье исследуется задача о положениях абсолютно нового механизма, защищенного патентом РФ [9], являющегося по своей структуре неассуровым.

Наиболее предпочтительным методом кинематического исследования таких механизмов является аналитический метод преобразования координат, который получил широкое применение при исследовании открытых кинематических цепей, а именно промышленных манипуляторов [10–19].

Прежде всего, покажем некий общий случай преобразования системы координат $O_1x_1y_1z_1$ к системе $O_0x_0y_0z_0$, (рис. 1). Пусть точка K имеет в пространственной системе координат $O_1x_1y_1z_1$ координаты $X_{K2}Y_{K2}Z_{K2}$. Чтобы найти эту точку в системе координат $O_0x_0y_0z_0$, необходимо вначале преобразовать $O_1x_1y_1z_1$ в систему координат $O_1x_1y_1z_1$, развернув оси координат по трем углам Эйлера φ_{21} , θ_{21} и ψ_{21} таким образом, чтобы далее можно было перенести её на расстояние l_1 , перейдя в систему координат $O_0x_1y_1z_1$. Затем преобразовать систему $O_0x_1y_1z_1$ в систему $O_0x_0y_0z_0$, развернув оси координат по углам Эйлера φ_{10} , θ_{10} и ψ_{10} .

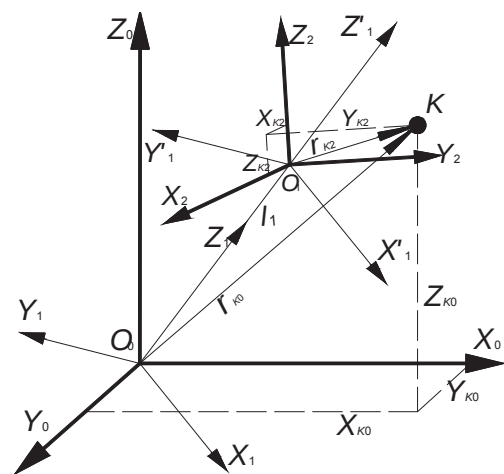


Рис. 1. Преобразование систем координат в три этапа

Fig. 1. Coordinate system transformation in three stages

Первое преобразование – разворот системы координат $O_1x_2y_2z_2$ по трем углам Эйлера (ψ_{21} , θ_{21} и φ_{21}) и переход к системе координат $O_1x_1y_1z_1$ запишется в виде матрицы:

$$r_{K1} = r_{K2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ab - cde & db - aec & df \\ 0 & -ae - cdb & -de + abc & -bf \\ l_1 & df & af & c \end{pmatrix},$$

$$a = \cos \psi_{21}; \quad b = \cos \varphi_{21}; \quad c = \cos \theta_{21};$$

$$d = \sin \psi_{21}; \quad e = \sin \varphi_{21}; \quad f = \sin \theta_{21}, \quad (1)$$

Элемент l_1 в последней строке первого столбца матрицы (1) определяет перенос начала системы координат $O_1x_1y_1z_1$ из точки O_1 в O_0 .

Второе преобразование – переход от системы $O_0x_1y_1z_1$ к $O_0x_0y_0z_0$ запишется в виде

$$r_{K0} = r_{K1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ab - cde & db + aec & df \\ 0 & -ae - cdb & -de + abc & -bf \\ 0 & df & ad & c \end{pmatrix},$$

$$a = \cos \psi_{10}; \quad b = \cos \varphi_{10}; \quad c = \cos \theta_{10};$$

$$d = \sin \psi_{10}; \quad e = \sin \varphi_{10}; \quad f = \sin \theta_{10}.$$

Матрицы преобразования систем координат называются тензорами преобразования i -й системы координат в j -ю и записываются в виде $T^{(i,j)}$.

Радиус вектор r_{k0} в общем виде записывается в следующей форме:

$$r_{k0} = r_{k2} T^{(1,0)} T^{(2,1)}.$$

Таким образом, при заданном радиусе векторе r_{k2} можно определить координаты точки k в любой другой системе координат.

Если произвести последовательные преобразования систем координат вдоль замкнутого контура звеньев начиная с некоторого звена или некоторой системы координат и вернуться к исходной системе координат, то такое преобразование будет являться тождественным. Это означает, что произведение тензоров равно единичному тензору E , которому ставится в соответствие единичная матрица, и уравнение движения для замкнутой цепи записывается в общем виде как

$$T^{(2,1)} \cdot T^{(3,2)} \cdot \dots \cdot T^{(n,n-1)} \cdot T^{(1,n)} = E. \quad (2)$$

Приравнивая соответствующие элементы результирующей матрицы и единичной, получим систему из двенадцати уравнений для пространственной кинематической цепи, так как элементы первых строк матрицы приводят к тождествам вида $1=1$ и $0=0$, не представляющим интереса. Обращаем внимание на то, что в произведении (2) тензоры располагаются слева направо в последовательности, противоположной преобразованиям систем координат.

Матрица вида $T^{(i,j)}$ описывает сущность любой кинематической пары. В зависимости от того, сколько движений реализует кинематическая пара, столько переменных используется в этой матрице.

Использование метода преобразования координат для замкнутых цепей, коими являются, в частности, неассуровы механизмы, требует выработки специального алгоритма решения, сводящегося к выбору неподвижной декартовой системы координат, относительно которой рассматривается весь механизм, и к последовательному приведению к ней координат начал всех подвижных систем координат, входящих в исследуемую цепь звеньев.

Так, при изучении относительных движений звеньев пространственного механизма, показанного на рис. 2, центры пар O_1 и O_4 освобождаются от связи с неподвижной опорой, фиксируются друг относительно друга размером L_4 и вся цепь рассматривается как цепь, обладающая семью подвижностями – шестью совместными движениями и одним относительным между входным – 1 и выходным – 3 звеньями.

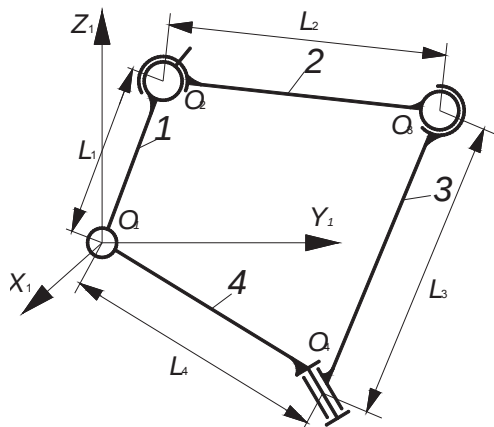


Рис. 2. Пример пространственной кинематической цепи, освобожденной от связей со стойкой: 1–4) звенья кинематической цепи

Fig. 2. Example of spatial kinematic chain removed from links with a holder: 1–4 are the links of kinematic chain

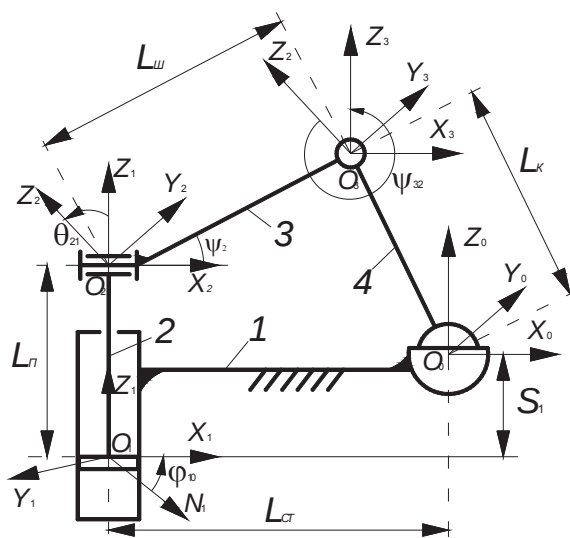
Связывая далее центр одной из кинематических пар с неподвижной системой координат, путем последовательного преобразования систем координат других кинематических пар, поворотами их на углы Эйлера и смещениями их на соответствующие длины звеньев, можно найти закон расположения центров всех кинематических пар относительно неподвижной системы координат.

Этот закон определяется относительными углами между звеньями и длинами звеньев, откуда становится возможным решить задачу о положениях звеньев, а далее путем дифференцирования полученных уравнений по времени найти относительные скорости и ускорения звеньев.

Рассмотренный выше метод является наиболее приемлемым для кинематического исследования пространственного неассурова механизма, кинематическая схема которого изображена на рис. 3. Применяя рассмотренный метод, каждому звену механизма присвоена однородная система координат, центр каждой такой системы координат находится в центре кинематических пар, связывающих звенья 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1 соответственно. Относительное расположение двух смежных звеньев характеризуется матрицей перехода от предыдущей системы координат к следующей.

Изображенный механизм приводится в движение поршнем 2, который движется поступательно и вращается относительно собственной оси. Поступательное движение поршня 2 является заданным, а его вращение определяется особенностью

связей остальных звеньев механизма. Механизм состоит из стойки – 1, поршня – 2, шатуна – 3 и коромысла – 4.



Начало системы координат $O_2x_2y_2z_2$ относится к шатуну и находится в центре вращательной кинематической пары, соединяющей поршень и шатун. Вращение происходит относительно оси O_2x_2 . Направления осей O_1x_1 и O_2x_2 параллельны, поэтому системы координат $O_2x_2y_2z_2$ и $O_1x_1y_1z_1$ совмещены по углам прецессии и собственного вращения, т. е. $\psi_{21}=0$ и $\varphi_{21}=0$. После подстановки этих углов в матрицу, описывающую преобразование углов Эйлера, тензор примет вид

$$T^{(2,1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\theta_{21}) & \sin(\theta_{21}) \\ L_{\Pi} & 0 & -\sin(\theta_{21}) & \cos(\theta_{21}) \end{pmatrix},$$

где L_{Π} – длина поршня – расстояние, равное смещению начала системы координат $O_2x_2y_2z_2$ относительно $O_1x_1y_1z_1$; θ_{21} – неизвестная переменная, характеризующая угол поворота шатуна относительно поршня.

Движение коромысла – 4 относительно шатуна – 3 определяется прецессией коромысла на угол ψ_{32} . Начало системы координат $O_3x_3y_3z_3$ относится к коромыслу и располагается в центре вращательной кинематической пары, соединяющей шатун и коромысло. Вращение происходит относительно оси O_3y_3 .

Разворачивая систему координат $O_2x_2y_2z_2$ на угол ψ_2 так, чтобы ось O_2x_2 совпала с направлением звена – 3, и перенеся начало системы координат $O_2x_2y_2z_2$ в точку O_3 , можно найти вращение коромысла – 4 относительно шатуна – 3.

Тензор преобразования системы координат $O_2x_2y_2z_2$ в $O_3x_3y_3z_3$ запишется в следующем виде:

$$T^{(2',2)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_{\Theta} & \cos(\psi_2) & \sin(\psi_2) & 0 \\ 0 & -\sin(\psi_2) & \cos(\psi_2) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где ψ_2 – угол наклона звена – 3 к оси O_2x_2 (является постоянной величиной); L_{Θ} – длина шатуна – расстояние, характеризующее смещение начала системы координат $O_3x_3y_3z_3$ относительно $O_2x_2y_2z_2$.

Выполненное преобразование учитывает геометрические параметры шатуна – 3 и не содержит переменных, поэтому тензор является постоянным и выражается числом.

Направления осей O_2y_2 и O_3y_3 параллельны, поэтому системы координат $O_3x_3y_3z_3$ и $O_2x_2y_2z_2$ совмещены по углам нутации и собственного вращения, т. е. $\theta_{32}=0$ и $\varphi_{32}=0$. Общий тензор преобразования системы координат $O_2x_2y_2z_2$ в $O_3x_3y_3z_3$ запишется в виде:

$$T^{(3,2)} = T^{(2',2)} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_{32}) & \sin(\psi_{32}) & 0 \\ 0 & -\sin(\psi_{32}) & \cos(\psi_{32}) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где ψ_{32} – неизвестная переменная, характеризующая угол поворота коромысла относительно шатуна.

Преобразование системы координат коромысла относительно начальной системы координат $O_0x_0y_0z_0$ изображено отдельно на рис. 4. Движение сферической кинематической пары характеризуется поворотом на три угла Эйлера (ψ_{03} , θ_{03} и φ_{03}).

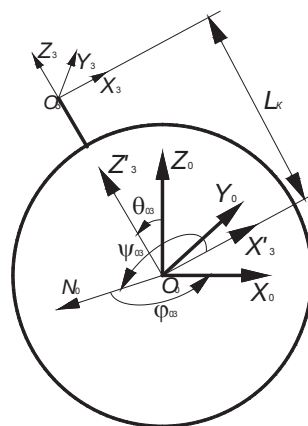


Рис. 4. Преобразование системы координат коромысла относительно начальной системы координат стойки

Fig. 4. Transformation of a rocker coordinate system relative to the original coordinate system of the holder

Матрица, описывающая движение сферической кинематической пары, запишется в виде:

$$T^{(0,3)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ab - cde & db + aec & af \\ 0 & -ae - cdb & -de + abc & -bf \\ L_{\Theta} & df & af & c \end{pmatrix},$$

$$a = \cos \psi_{03}; \quad b = \cos \varphi_{03}; \quad c = \cos \theta_{03};$$

$$d = \sin \psi_{03}; \quad e = \sin \varphi_{03}; \quad f = \sin \theta_{03},$$

где L_{Θ} – длина коромысла – расстояние, характеризующее смещение начала системы координат $O_3x_3y_3z_3$ относительно $O_0x_0y_0z_0$; ψ_{03} , θ_{03} и φ_{03} – неизвестные переменные, определяющие прецессию, нутацию и собственное вращение коромысла – 3 относительно звена – 1.

Последовательное преобразование систем координат вдоль замкнутого контура является тождественной операцией, а произведение тензоров можно приравнять к единичной матрице (2), которая примет вид

$$T^{(1,0)} \cdot T^{(2,1)} \cdot T^{(3,2)} \cdot T^{(0,3)} = E.$$

После перемножения тензоров, отражающих движения, совершаемые в кинематических парах, полученная матрица решалась в численном виде. Для этого заданы параметры всех звеньев механизма (мм), а именно: $L_{CT}=166$; $L_{\Pi}=122$; $L_{\Theta}=205$; $L_K=120$; $S_1=111$; $\psi_2=30^\circ$.

Результаты расчетов занесены в таблицу, где приведены двенадцать значений всех неизвестных переменных (φ_{10} , θ_{21} , ψ_{32} , ψ_{03} , θ_{03} и φ_{03}).

Таблица. Значения переменных (φ_{10} , θ_{21} , ψ_{32} , ψ_{03} , θ_{03} и φ_{03}) в зависимости от хода поршня (S_1) для 12 положений механизма

Table. Values of the variables (φ_{10} , θ_{21} , ψ_{32} , ψ_{03} , θ_{03} и φ_{03}) depending on piston travel (S_1) for 12 positions of the mechanism

S_1 , MM (mm)	φ_{10}	θ_{21}	ψ_{32}		ψ_{03}	θ_{03}	φ_{03}
	рад/рад						
	+/-	+/-				+/-	+/-
0	0,84	0,93	-0,35	0,24	0,331	1,17	1,41
9,31	0,85	0,87	-0,33	0,22	0,317	1,11	1,43
18,61	0,85	0,80	-0,31	0,20	0,299	1,04	1,45
27,92	0,86	0,73	-0,29	0,18	0,277	0,97	1,44
37,17	0,85	0,66	-0,27	0,16	0,257	0,90	1,43
55,75	0,80	0,49	-0,23	0,10	0,240	0,73	1,36
65,04	0,75	0,41	-0,20	0,07	0,260	0,64	1,27
74,34	0,68	0,31	-0,18	0,05	0,284	0,54	1,16
83,63	0,57	0,24	-0,15	0,02	0,308	0,42	0,98
92,92	0,39	0,16	-0,12	0,00	0,331	0,27	0,69
102,21	0,05	0,01	-0,09	-0,02	0,350	0,06	0,17
111,51	0	0	-0,06	0,360	0	0	

Из таблицы видно, что углы φ_{10} , θ_{21} , ψ_{32} , θ_{03} и φ_{03} принимают по два значения при одном и том же положении поршня. Это связано с тем, что из крайнего верхнего положения механизм может «наклониться» влево или вправо относительно стойки, при этом изменяется лишь знак угла.

На рис. 5 приведена кривая, отражающая изменение угла φ_{10} , в зависимости от положения входного звена. Отрицательные значения углов определяют наклон механизма влево относительно звена – 1, а положительные значения – вправо.

Первый столбец переменной ψ_{32} (только отрицательные значения) соответствует наклону механизма влево относительно стойки – 1, второй столбец переменной ψ_{32} соответствует наклону механизма вправо относительно звена – 1. Закон изменения ψ_{03} не зависит от того в какую сторону наклоняется механизм.

Таким образом, кинематика нового пространственного неассурова механизма полностью исследована, получены законы относительного углового перемещения всех смежных звеньев. Рассмотренный способ позволяет решить задачу о положениях для любого, в том числе и неассурова, меха-

низма у которого группа звеньев, взятая за исключением ведущего звена, обладает отрицательной подвижностью и является статически неопределимой. Немаловажной особенностью этого метода является то, что если в рассмотренной замкнутой кинематической цепи механизма принять в качестве стойки любое другое звено, законы относительного расположения звеньев не изменятся.

Возможная область применения рассматриваемого механизма включает в себя такие отрасли промышленности как металлургия, станкостроение, горнодобывающая и нефтедобывающая отрасли. В качестве примера можно привести механизмы ориентации заготовок, работающих на конвейерном производстве, дозаторы сыпучих или жидких тел, разливочные устройства, аппараты точечной сварки на конвейерах машиностроения для позиционирования рабочего органа сварочной машины.

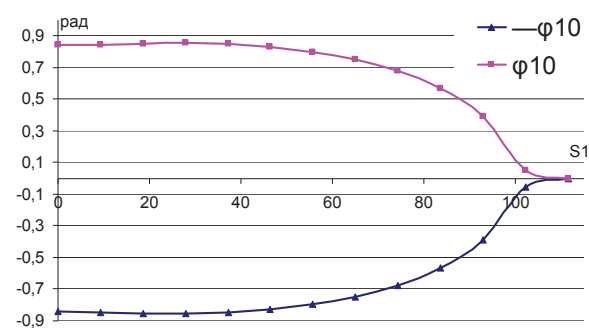


Рис. 5. Переменная φ_{10} в 12 различных положениях механизма

Fig. 5. Variable φ_{10} in 12 different positions of the mechanism

Исследованный механизм может использоваться в нефтедобывающей отрасли в качестве аналога станков-качалок штанговых насосов [20, 21]. Если за ведущее звено принять пространственное коромысло, то при качании коромысла поршень выходного звена получит возвратно-поступательные перемещения, необходимые для работы штангового насоса. К достоинствам новой конструкции стоит отнести пространственную кинематическую цепь, которая не требует строгой параллельности или перпендикулярности при соединении звеньев, механизм является самоустанавливающимся по своей структуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников Л.Т. Основы всеобщей (универсальной) классификации механизмов // Теория механизмов и машин. – 2011. – № 2 (9). – С. 4–37.
2. Пожбелко В.И. Универсальная теория структуры, общие свойства и алгоритмы направленного синтеза и анализа статически определимых систем. Ч. 1. Оптимальная структура механизмов и ферм // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 24–35.
3. Пожбелко В.И. Структурный синтез и конструирование рычажных и планетарных самоустанавливающихся механизмов // ЮУрГУ. Машиностроение. – 2011. – № 31. – С. 4–14.
4. Деграве В.С. Особые положения плоских неассуровых групп с

внутренними входами // Теория механизмов и машин. – 2006. – Т. 4. – № 2 (8). – С. 81–85.

5. Колобовникова И.Н., Яскевич О.М. Структурный анализ и описание пространственного смесительного механизма // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 154.
6. Колобовникова И.Н., Яскевич О.М. Моделирование и кинематический анализ пространственного смесительного механизма // Студенческий научный форум: Материалы VI Международного студенческого электронного науч. конф. URL: www.scienceforum.ru/2014/695/7032 (дата обращения: 20.09.2014).
7. Яскевич О.М. Описание и возможное применение пространственного неассурова механизма // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 5 (105). – С. 79–81.

8. Пейсах Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера). Ч. 1 // Теория механизмов и машин. – 2008. – Т. 6. – № 1 (11). – С. 4–14.
9. Пространственный смесительный механизм: пат. РФ № 248486, 2012104940; заявл. 13.02.2012; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 5 с.
10. Лебедев П.А. Кинематика пространственных механизмов. – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.
11. Машнев М.М., Красковский Е.Я., Лебедев П.А. Теория механизмов и машин и детали машин. – Л.: Машиностроение, 1980. – 512 с.
12. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2-х т. Т. I. Статика и кинематика. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
13. Диментберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
14. Доронин Ф.А. К вопросу об определении угловых скоростей звеньев замкнутой кинематической цепи // Теория механизмов и машин. – 2014. – № 1 (23). – С. 41–49.
15. Применение винтового исчисления в современной теории механизмов / В.А. Глазунов, С.Д. Костерева, П.О. Данилин, А.Б. Ласточкин // Вестник научно-технического развития: интернет-журнал. – 2010. – № 6 (34). URL: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=426> (дата обращения: 20.09.2014).
16. Зиборов К.А., Мацюк И.Н., Шляхов Э.М. Решение векторных уравнений кинематики механизмов с помощью программы MathCad // Теория механизмов и машин. – 2008. – № 1 (11). – С. 64–70.
17. Подольский М.Е. О методе Эйлера в применении к кинематике и динамике твердого тела // Теория механизмов и машин. – 2013. – Т. 11. – № 2 (22). – С. 38–44.
18. Пальмов В.А. Элементы тензорной алгебры и тензорного анализа. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. – 108 с.
19. Вильчевская Е.Н. Тензорная алгебра и тензорный анализ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 42 с.
20. Мохов М.А., Игrevский В.И., Новик Е.С. Станок-качалка. Краткий электронный справочник по основным нефтегазовым терминам с системой перекрестных ссылок. – М.: Российский государственный университет нефти и газа, 2004. – 451 с.
21. Станок-качалка. Горная энциклопедия / под ред. Е.А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – Т. 5 – 481 с.

Поступила 13.10.2014 г.

UDC 62–121; 621.01

KINEMATIC RESEARCH OF SPATIAL FOUR-LINK NOT ASSURIAN MECHANISM

Oleg M. Yaskevich,

Siberian State Industrial University, 42, Kirov Street, Novokuznetsk, 654007, Russia. E-mail: Yaskevich_omm@mail.ru

Leonid T. Dvornikov,

Dr. Sc., Siberian State Industrial University, 42, Kirov Street, Novokuznetsk, 654007, Russia. E-mail: tmmiok@yandex.ru

Relevance of the research is caused by the need to explore new mechanisms that differ in structure from the Assyrians ones, for their subsequent usage in engineering practice.

The main aim of the study is to study and development the universal method for researching mechanisms regardless of their structure, as well as the link adopted as the fixed one, on the example of kinematic study of a new patented not-assurian mechanism; to define the transition tensors for the kinematic pairs used in this mechanism; to obtain graphic dependences of the relative links positions to the input member.

The methods used in the study: analytical method for converting homogeneous coordinates, known as a method of screw affiners. Euler angles were used to determine the relative angular displacement of links.

The results. The authors have made an algorithm for studying the mechanisms, including not-assurian ones and determined the transformation tensors for one-mobile rotational kinematic pair of V class, for two-moving pair of IV class, implemented on the basis of the hydraulic cylinder and the piston and three-moving spherical joint of the III class. The graphic dependences of all unknown variables determining relative position of links of the studied mechanism in space were obtained.

Conclusions. The paper substantiates the universal method for researching mechanisms regardless of their structure. If the mechanism is synthesized on the basis of the closed Grubler circuit, and its kinematics is researched by the considered methods, the universal solution for a group of analogical mechanisms, that have different link, adopted as a fixed rack, were obtained. The paper introduces the algorithm of creating the transition tensor from one coordinate system to another. A similar approach allows describing analytically any kind of relative connection of two adjacent links, which is not discussed in the article.

Practical application. At rod pump operation in pumping units of the mechanized installations oil pump, the reciprocating movement is used. It is obtained by means of the rod pumping unit. If the spatial four-link mechanism is set in motion by means of the piston, the reciprocating movement of the output member will be assured. This can be used as an analogue of pumping units in oil mechanized installations.

Key words:

New not-assurian mechanism, analytical method, tensors of kinematic pairs transformation, relative positions of links, pumping unit, sucker rod pump, self-aligning mechanism.

REFERENCES

1. Dvornikov L.T. Osnovy vseobshchey (universalnoy) klassifikatsii mekhanizmov [Bases of general (universal) classifications of mechanisms]. *Theory of mechanisms and machines*, 2011, no. 2 (9), pp. 4–37.
2. Pozhbelko V.I. Universalnaya teoriya struktury, obshchie svoystva i algoritmy napravlennoy sinteza i analiza staticheskoy opredelimykh sistem. Ch. 1. Optimalnaya struktura mekhanizmov i ferm [Universal theory of the structure of the general properties and algorithms for the directed synthesis and analysis of statically determinate systems. P. 1. Optimum structure and mechanisms of farms]. *Proceedings of the higher educational institutions*, 2014, no. 1, pp. 24–35.
3. Pozhbelko V.I. Strukturny sintez i konstruirovaniye rychaznykh i planetarnykh samoustanavlivayushchikhsya mekhanizmov [Structural synthesis and design of the lever and planetary self-aligning mechanisms]. *YuUrGU. Mashinostroenie*, 2011, no. 31, pp. 4–14.
4. Degraeve V.S. Osobyie polozeniya ploskikh neassurovnykh grupp s vnutrennimi vkhodami [Special positions of plane non-assur structural groups with internal inputs]. *Theory of mechanisms and machines*, 2006, no. 2 (8), pp. 81–85.
5. Kolobovnikova I.N., Yaskevich O.M. Strukturny analiz i opisaniye prostranstvennogo smesitelnogo mekhanizma [The structural analysis and description of the spatial mixing mechanism]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya nauchno – The successes of modern science*, 2012, no. 6, p. 154.
6. Kolobovnikova I.N., Yaskevich O.M. Modelirovaniye i kinematicheskyy analiz prostranstvennogo smesitelnogo mekhanizma [Modeling and kinematic analysis of spatial mixing mechanism]. *Materialy VI mezhdunarodnoy studencheskoy elektronnoy nauchnoy konferentsii. Studenchesky nauchny forum*. 2014. Available at: www.scienceforum.ru/2014/695/7032 (accessed 20 September 2014).
7. Yaskevich O.M. Opisaniye i vozmozhnoye primeneniye prostranstvennogo neassurova mekhanizma [Description and possible application of spatial non-assur mechanism]. *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 5 (105), pp. 79–81.
8. Peysax E.E. Strukturny sintez zamknutykh kinematicheskikh tsepey (tsepey Gryublera). [Structural synthesis of closed kinematic chains (Grubler chains). P. 1]. *Theory of mechanisms and machines*, 2008, no. 1 (11), pp. 4–14.
9. Dvornikov L.T., Yaskevich O.M. *Prostranstvenny smesitelny mekhanizm* [Spatial mixing mechanism]. Patent RF, no. 248486, 2012104940, 2013.
10. Lebedev P.A. *Kinematika prostranstvennykh mekhanizmov* [Kinematics of spatial mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 280 p.
11. Mashnev M.M., Kraskovsky E.Ya., Lebedev P.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin i detali mashin* [Theory of Mechanisms and Machines and Machine Parts]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 512 p.
12. Loytsyansky L.G., Lurye A.I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. T. I. Statika i kinematika* [Course of theoretical mechanics. Vol. 1. Statics and kinematics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 352 p.
13. Dimentberg F.M. *Teoriya prostranstvennykh sharnirnykh mekhanizmov* [The theory of spatial hinge mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 336 p.
14. Doronin F.A. K voprosu ob opredelenii uglovykh skorostey zveney zamknutoy kinematicheskoy tsepi [On the issue of calculation of angular speeds of links of the closed kinematic chains]. *Theory of mechanisms and machines*, 2014, no. 1 (23), pp. 41–49.
15. Glazunov V.A., Kostereva S.D., Danilin P.O., Lastochkin A.B. Primeneniye vintovogo ischisleniya v sovremennoy teorii mekhanizmov [The use of screw calculus in the modern theory of mechanisms]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya: Internet-zhurnal*, 2010, no. 6 (34). Available at: www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=426 (accessed 20 September 2014).
16. Ziborov K.A., Matsyuk I.N., Shlyakhov E.M. Resheniye vektornykh uravneniy kinematiki mekhanizmov s pomoshchyu programmy MathCad [The solution of kinematic and dynamic analysis vector using MathCAD]. *Theory of mechanisms and machines*, 2008, no. 1 (11), pp. 64–70.
17. Podolsky M.E. O metode Eylera v primeneniye k kinematike i dinamike tverdogo tela [On application of Euler’s approach to kinematics and dynamics of rigid body]. *Theory of mechanisms and machines*, 2013, no. 2 (22), pp. 38–44.
18. Palmov V.A. *Elementy tenzornoy algebry i tenzornogo analiza* [Elements of tensor algebra and tensor analysis]. St-Petersburg, SPbGPU Publ. house, 2008. 108 p.
19. Vilchevskaya E.N. *Tenzornaya algebra i tenzorny analiz* [Tensor algebra and tensor analysis]. St-Petersburg, SPbGPU Publ. house, 2013. 42 p.
20. Mokhov M.A., Igrevsky V.I., Novik E.S. *Stanok-kachalka. Kratkiy elektronnyy spravochnik po osnovnym neftegazovym terminam s sistemoy perekrestnykh ssylok* [Pumping unit. The online Quick on major oil and gas terms with the system of cross-references]. Moscow, Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza, 2004. 451 p.
21. Stanok-kachalka. Gornaya entsiklopediya [Pumping unit. Mountain encyclopedia]. Ed. by. Kozlovsky E.A. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1984. Vol. 5, 481 p.

Received: 13 October 2014.

УДК 004.89

РАЗРАБОТКА МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТНЫХ СЦЕНАРИЕВ

Массель Людмила Васильевна,

д-р техн. наук, зав. лабораторией информационных технологий в энергетике
Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, 664033,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130. E-mail: massel@isem.sei.irk.ru

Гальперов Василий Ильич,

аспирант лаборатории информационных технологий в энергетике
Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130. E-mail: galperov@gmail.com

Актуальность работы определяется, с одной стороны, развитием концепции «интеллектуальной сети» (Smart Grid), одним из важных аспектов которой является использование многоагентных технологий, с другой – малым количеством практических подходов к реализации многоагентных систем. В современных условиях, для функционирования и управления электроэнергетических систем требуется создание расчетной модели для схем большой размерности на базе методов оценивания состояния. Такие схемы не полностью наблюдаемы, возможно искажение данных, плохая их синхронизация и, как следствие, принятие неправильных решений, формируемых на базе расчетной модели. Существует необходимость в разработке новых методов и программных средств для оценивания состояний, которые позволят исключить эти проблемы.

Цель работы: провести обзор агентных решений, имеющихся в настоящее время на рынке информационных технологий; рассмотреть недостатки существующих систем и предложить основанный на использовании агентных сценариев подход к разработке многоагентных систем для решения энергетических задач, который позволит устранить эти недостатки.

Методы исследования. В настоящее время агентный подход не применяется для разработки систем, направленных на решение задач в области электроэнергетики и оценивания состояний электроэнергетических систем в частности. Предлагаемый подход к разработке многоагентных систем должен обеспечивать возможность взаимодействия агентов, созданных на разных программных платформах, создания новых и редактирование существующих алгоритмов в системе посредством агентных сценариев.

Результаты. Разработан подход к созданию многоагентных систем для оценивания состояний электроэнергетических систем с возможностью межплатформенных взаимодействий и агентных сценариев. Предлагаемый подход был апробирован на тестовой системе, и в данный момент разрабатывается система для оценивания состояний электроэнергетических систем.

Ключевые слова:

Агент, многоагентные системы, оценивание состояний ЭЭС, агентные сценарии, Smart Grid.

Введение

Развитие рыночных отношений в электроэнергетике России привело к появлению новых задач, для решения которых необходима расчетная модель текущего режима электроэнергетической системы, получаемая на основе данных телеизмерений с помощью методов оценивания состояния (ОС) [1, 2].

Одной из тенденций развития современных энергетических систем является концепция интеллектуальных энергетических систем (Smart Grid), которая нацелена на создание электрических сетей, удовлетворяющих будущим требованиям по энергоэффективному и экономичному функционированию энергосистемы за счет скоординированного управления и при помощи современных двусторонних коммуникаций между элементами электрических сетей, электрическими станциями, аккумулирующими источниками и потребителями [3].

Существенно улучшить свойства решения задачи оценивания состояния позволяет использование измерений, поступающих от устройств измерения комплексных электрических величин – PMU (Phasor Measurement Units) [4]. Измерения, поступаю-

щие от PMU, более полно отражают режим рабочей схемы электроэнергетических систем (ЭЭС). Кроме этого, важное место в этой концепции занимает *многоагентный подход* к созданию автоматизированных программных средств управления электроэнергетическими системами. Одними из основных направлений работ по развитию автоматизированной системы управления режимами являются разработка алгоритмов выявления предаварийных состояний энергосистем и диагностики электротехнического оборудования на основе методов оценивания состояний и параметрической идентификации и создание систем распределенного расчета режимов энергосистем. Применение многоагентного подхода позволит разработать оперативную и гибкую в настройке систему оценивания состояний ЭЭС [5].

К сожалению, в отношении агентных технологий практически нет четких методов разработки и алгоритмов функционирования применительно к задачам энергетики. Основные достижения в этой части в основном ориентируются на аспекты теоретической реализации и пока далеки от практики. В статье рассматриваются существующие решения, их недостатки и предлагается подход, направленный на их устранение.

Определение агента

Под агентом принято понимать автономный процесс, способный реагировать на среду исполнения и вызывать в ней изменения, возможно, в кооперации с пользователями или другими агентами. Нередко агенты понимаются как вычислительные единицы, поддерживающие локальные состояния и параллельные вычисления, а также способные в процессах коммуникации достигать состояния других агентов и автоматически выполнять действия в некоторых условиях среды [6, 7]. Также под агентом понимается «любая сущность, которая находится в некоторой среде, воспринимает ее посредством сенсоров, получая данные, которые отражают события, происходящие в среде, интерпретирует эти данные и действует на среду посредством эффекторов». Таким образом, здесь выделяются четыре исходных фактора, образующих агента: среда, восприятие, интерпретация, действие [8].

Как правило, агенты действуют параллельно. Контроль и обработка данных логически разделены между различными элементами. Чтобы решать проблемы совместно, агенты должны общаться, координироваться и вести переговоры друг с другом, как только они оказываются в конфликтной ситуации. Системы, содержащие группу агентов, которые могут взаимодействовать между собой, и называются мультиагентными системами. Основные преимущества использования многоагентных систем, это: распределенные вычисления, масштабирование и автономность. Агенты должны быть распределены по локальной сети для обеспечения децентрализованной обработки данных. Они должны уметь общаться между собой, обмениваться информацией и кооперироваться для выполнения задач.

Существующие подходы к разработке многоагентных систем

Для организации процесса распределения задачи в многоагентных системах создается либо система распределенного решения проблемы, либо децентрализованная система искусственного интеллекта. В случае использования последней распределение заданий происходит в процессе взаимодействия агентов и носит больше спонтанный характер [9].

Децентрализованная система искусственного интеллекта используется в основном для агентного моделирования в том случае, когда больше важен не финальный результат, а организация процесса. Например, моделирование поведения толпы при эвакуации или же торги между продавцом и покупателем на рынке. Тогда каждый агент будет преследовать свои собственные цели, которые могут быть полностью противоположны интересам других агентов.

Одним из самых известных программных продуктов, реализующих данную концепцию, является AnyLogic. Это инструмент имитационного моде-

лирования, который позволяет проектировать агентные, системно-динамические, дискретно-событийные и «многоподходные» модели [10]. Также AnyLogic предоставляет широкий спектр отчетов и статистику по работе модели. Для создания моделей в основном используется графический редактор, где пользователь визуально описывает все составные элементы будущей модели. Для задания логики поведения отдельных элементов созданной модели применяется объектно-ориентированный язык программирования Java.

Однако же программные средства, придерживающиеся данной концепции, подходят исключительно для моделирования процессов и не могут помочь при решении каких-либо вычислительных задач. Если нам необходимо решать комплексные вычислительные задачи, то в такой ситуации агенты должны действовать сообща, чтобы выполнить задачу максимально качественно и в наиболее короткие сроки. Также во время работы системы в нее могут входить новые агенты, а другие перестают работать. Агенту необходимо получать информацию о других агентах, находящихся в системе, чтобы знать, с кем можно взаимодействовать. В таком случае выполняется процесс декомпозиции глобальной задачи и обратный процесс агрегирования найденных решений происходит под управлением некоторого единого «центра». При этом многоагентная система проектируется строго сверху вниз, исходя из ролей, определенных для агентов, и результатов разбиения глобальной задачи на подзадачи. Несмотря на большое количество программных реализаций для этого типа задач многие из них уже не развиваются и не поддерживаются разработчиками.

Кроме этого, одной из современных технологий для построения многоагентных систем является SOA (Service Oriented Architecture). Преимущества использования Web-сервисов для реализации агентов рассмотрены в [11–15]. Однако данный подход применялся лишь в единичных случаях.

Для разработки стандартов в области создания многоагентных систем была сформирована организация FIPA (Foundation for Intelligent Physical) [16]. Было достаточно много разработок, которые поддерживали стандарты, предложенные FIPA, среди них такие, как: Java Intelligent Agent Componentware, The SPADE Multiagent and Organizations Platform, JACK Intelligent Agents, The Fipa-OS agent platform, AgentService, Zeus Agent Building Toolkit и другие.

Одной из широко распространенных программных сред для разработки многоагентных систем является JADE, написанная на языке Java [17]. JADE использует концепцию распределенного решения задач. Основой данной системы является программная среда, без нее невозможно существование агентов. Внутри среды формируются контейнеры, в которые затем помещаются агенты. После запуска каждый агент должен передать данные о себе в один из контейнеров, чтобы зарегистри-

стрироваться в системе. Далее программная среда будет наблюдать за работой всей системы и при необходимости производить требуемые управляющие воздействия на отдельных агентов. Между собой агенты обмениваются при помощи сообщений на языке ACL, который поддерживает стандарт FIPA [18]. Сообщения могут носить разный характер: запрос, информирование, передача данных и т. д. Во время своей работы агент накапливает сообщения, которые приходят ему от других агентов и по очереди занимается их обработкой.

JADE на данный момент является одним из наиболее активно развивающихся «Фреймворков» для разработки многоагентных систем. Однако привязка исключительно к платформе Java ограничивает ее использование. В случае, если исходная программа создана на другом языке программирования, могут возникнуть проблемы при организации взаимодействия между JADE-элементами и компонентами самой программы. Также есть проблема модернизации существующих систем, уже использующих платформу JADE. Для изменения алгоритма работы системы необходимо вмешательство специалиста-программиста. Это мешает пользователю вносить корректировки в работу какого-либо конкретного алгоритма, заложенного в систему. Таким образом, на данный момент существует очень небольшое количество платформ, позволяющих организовывать работу многоагентных систем. Большинство созданных ранее систем уже не поддерживаются и не развиваются, за исключением единичных представителей.

Именно поэтому разработка новых подходов к реализации многоагентных систем является актуальной и востребованной задачей.

Алгоритм поведения агентов

Конкретный агент не изолирован от других агентов. Предлагается осуществлять обмен информацией между отдельными агентами системы посредством передачи XML-файлов по сети. Для передачи данных по локальной сети очень распространен стек протоколов TCP/IP. Большинство программных платформ могут использовать TCP/IP для передачи данных по сети. Таким образом, при помощи TCP/IP мы можем обмениваться информацией между программами, написанными на разных программных платформах. То же самое касается и агентов. В том случае, если какую-то задачу проще реализовать и рассчитывать на конкретной платформе, можно использовать агента, работающего именно под ней, – он точно так же сможет взаимодействовать с другими агентами. XML-файлы, которые используются в системе, состоят из двух частей. В первой части находится информация о местонахождении агента в локальной сети, чтобы агент-получатель знал, по какому адресу ему необходимо отправлять ответ [19].

Для этого вся информация, касающаяся существующих в системе агентов, хранится централизованно в главном модуле. Он составляет и редактирует список активных агентов, следит за ходом выполнения работы, а также хранит исходные данные для расчетов, промежуточные и итоговые

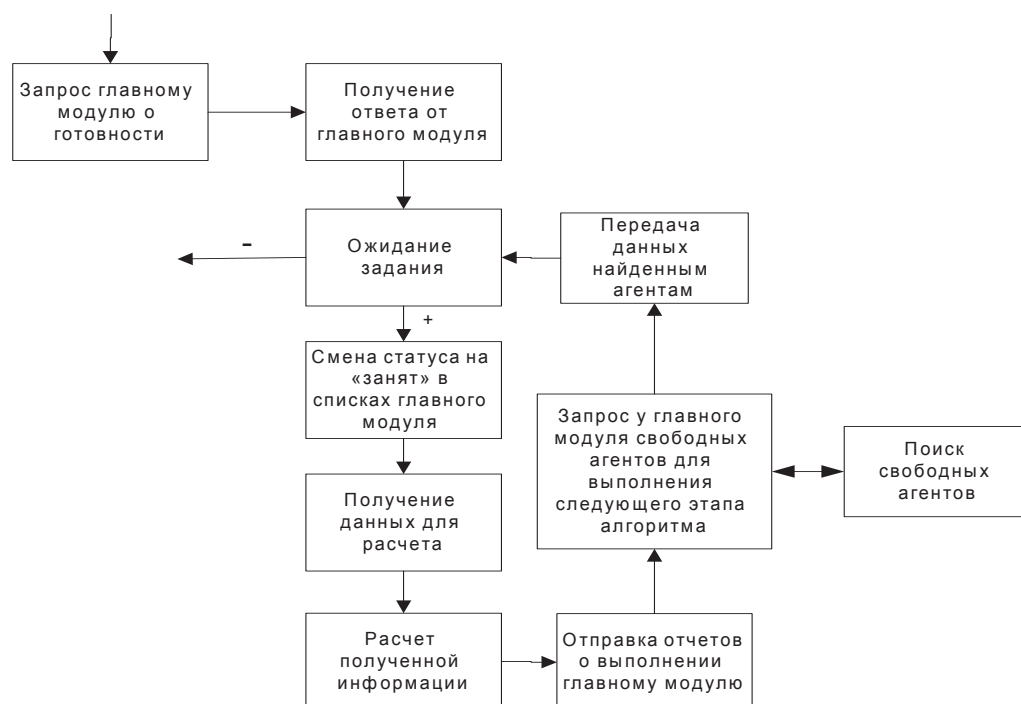


Рис. 1. Схема общего алгоритма работы агентов

Fig. 1. Diagram of general algorithm of agent functioning

результаты работы агентов. Про изменение в своем состоянии агент должен известить главный модуль, чтобы тот обладал актуальной информацией о состоянии системы. В том случае, если агент выполняет работу дольше, чем планировалось, главный модуль отправляет запрос, чтобы агент передал отчет о ходе выполнения работы. В случае, если ответ от агента не приходит (агент «завис», отключился и т. д.), главный модуль удаляет его из списка агентов и перепоручает его работу другому свободному в данный момент агенту или ждет пока таковой освободится.

На рис. 1 представлен общий алгоритм работы агента. После того как агент включился и готов к работе, он направляет информацию о себе главному модулю, чтобы тот внес его в список активных агентов и в дальнейшем к нему могли обращаться другие агенты. Далее агент ждет поступления новой задачи и после этого начинает выполнять вычисления. После окончания вычислений агент формирует об этом главный модуль. Когда агент выполнит свою часть алгоритма, он должен передать данные другому агенту, который продолжит вычисления. До начала передачи этого агента необходимо найти. Его поисками будет заниматься тот агент, который только что закончил свою часть алгоритма. Он запрашивает у главного модуля список свободных на данный момент агентов и отправляет каждому запрос. Как только агентом получен ответ, информация передается главному модулю, а данные для расчета отсылаются найденному агенту. Выход из алгоритма осуществляется после завершения вычислений.

Распределенное решение задач

Одно из основных преимуществ многоагентных систем – распределенная обработка данных. Нецелесообразным является использование многоагентных систем для реализации линейных алго-

ритмов решения задач, поскольку затраты времени на пересылку данных по сети будут лишь тормозить процесс расчета задач. Однако в случае, когда алгоритм позволяет проводить какие-либо вычисления параллельно, распределенная обработка может значительно сократить время расчетов. Поэтому при поиске агентов могут возникнуть сложные ситуации, требующие кооперации между агентами. Основные возможные ситуации, которые могут возникнуть при поиске агентов, указаны на рис. 2.

В первом случае (а) агенту необходимо найти другого агента. В данной ситуации никаких сложностей нет. Первый же ответивший на запрос агент становится искомым и приступает к выполнению задания.

Вторая ситуация (б) ненамного отличается от первой. Здесь один агент должен найти двух или более агентов, чтобы те продолжили решать задачу, выполняя параллельные вычисления. Важно обработать ситуацию, когда из требуемого количества агентов свободны только несколько. В таком случае следует дать задание свободным агентам, после этого запросить у главного модуля обновленный список и продолжить поиски до тех пор, пока не найдется свободный.

Самая проблематичная ситуация, когда нескольким агентам необходимо найти одного (в). Это может произойти, если распределенный этап алгоритма сменяется линейным этапом. В этом случае агентам необходимо взаимодействовать друг с другом, чтобы определить следующего агента. Каждый должен знать координаты остальных агентов, чтобы информировать друг друга о результатах поиска. Все агенты начинают поиск в тот момент, когда закончат выполнять свою задачу. Тот агент, который первым нашел свободного агента, извещает остальных об этом и пересылает им адрес найденного агента, чтобы они знали, куда переда-

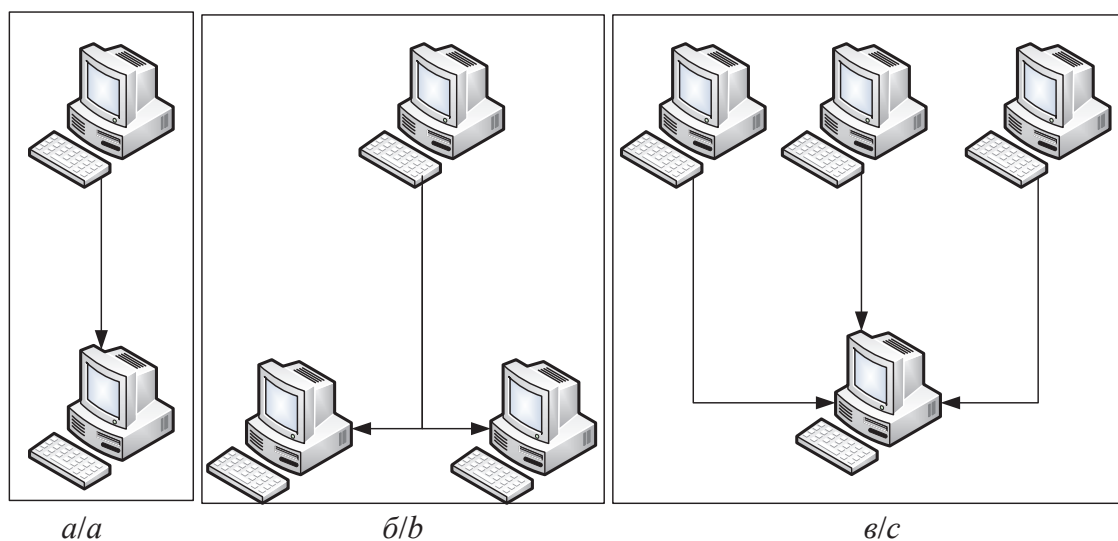


Рис. 2. Ситуации, которые могут возникнуть при поиске агентов

Fig. 2. Situations occurring at agent searching

вать данные. Может произойти так, что два агента одновременно обнаружили свободного. Поэтому перед тем как передавать данные найденному агенту, агенты-поисковики должны достигнуть единого мнения в том, какого из найденных агентов они будут использовать. Определяется, какой из агентов был найден раньше, тому и отдается предпочтение. Когда агенты-поисковики окончательно утвердили кандидатуру следующего агента, они передают ему данные для расчетов.

Агентные сценарии

Агентные сценарии предлагаются для редактирования алгоритма решения задачи без участия программистов. Сценарии формируются пользователями-экспертами. Каждый агент в системе выполняет определенный этап того или иного алгоритма. Однако возможны случаи, когда необходимо внести изменения в процесс решения задач.

Для того чтобы не приходилось вносить изменения в главный модуль, и чтобы пользователь мог сам редактировать существующий алгоритм, предлагается использовать сценарии для агентов. После включения агент должен передать главному модулю не только информацию о своем местонахождении в сети, но и о тех задачах, которые он умеет решать.

Таким образом, составляется список различных типов агентов. Когда пользователю нужно провести расчеты, он может собственноручно выстраивать порядок, в котором будут вызваны те или иные агенты. При необходимости он сможет отредактировать существующий алгоритм, добавив новые этапы расчетов или убрать существующие, чтобы получить промежуточные результаты. Пример агентного сценария для решения задачи оценивания состояния ЭЭС приведен на рис. 3. Там изображены два сценария оценивания состояния ЭЭС с разным методом декомпозиции исходной схемы.

В некоторых ситуациях агенту для решения задачи необходимо получить от пользователя дополнительные параметры. В таком случае агенты могут передавать не только информацию о местонахождении и решаемых задачах, но и о параметрах, которые требуются от пользователя. На основании полученных от агента данных главный модуль сгенерирует форму для ввода значений и передаст ее пользователю. Форма должна состоять из графических элементов интерфейса, таких как: списки, поля ввода текста, поля ввода чисел и т. д. После ввода необходимой информации пользователь отправляет ее главному модулю. Главный модуль проверяет корректность введенной пользователем информации на основании тех ограничений, которые ему передал агент. После проверки данные возвращаются агенту, и на их основании он выполняет требуемые вычисления.

Основное преимущество применения многоагентного подхода – это возможность организовать

распределенную обработку данных. При создании нового или редактировании существующего сценария у пользователя должна быть возможность указать те места, в которых данные можно разделить между несколькими агентами одного типа. Также в сценарии можно будет задать максимальное и минимальное количество агентов, между которыми будет распределена задача. Данная ситуация иллюстрируется на рис. 4.

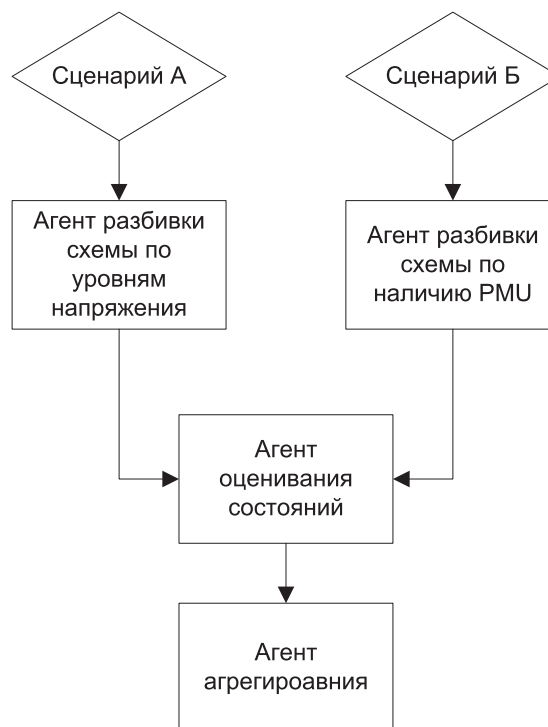


Рис. 3. Агентные сценарии для задачи оценивания состояний ЭЭС

Fig. 3. Agent scenarios for estimating electric power system

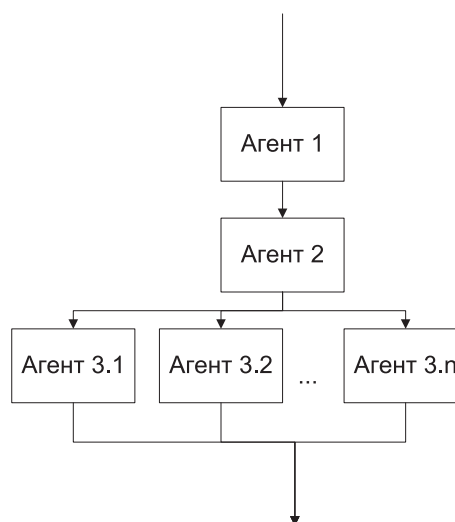


Рис. 4. Распределение задачи между агентами одного типа

Fig. 4. Task distribution among one-type agents

Для создания более «гибких» алгоритмов также предлагается добавлять в сценарии условные операторы и циклы (рис. 5). В таком случае полученные на текущем этапе результаты будут проходить логическую проверку, по итогам которой будет выполняться то или иное действие.

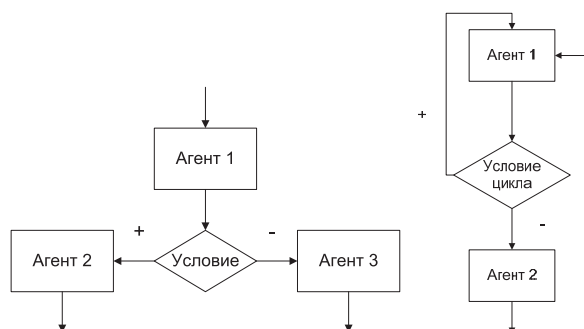


Рис. 5. Условные операторы и циклы в агентных сценариях

Fig. 5. Conditional constructs and cycles in agent scenarios

Применение предложенного подхода для решения распределенной задачи оценивания состояний электроэнергетических систем

На рис. 6 приведена общая схема многоагентной системы для оценивания состояния ЭЭС [20].

Система должна обеспечивать возможность выполнения следующих функций:

- деление расчетной схемы ЭЭС на подсистемы;
- оценивание состояния подсистем;
- решение координационных задач между подсистемами;
- агрегирование результатов расчетов.
- обеспечение возможности работы агентов в локальной сети.

Сначала клиент передает главному модулю системы исходную схему ЭЭС для расчетов, после этого начинается поиск агента.

На первом этапе производится декомпозиция расчетной схемы по уровням узловых напряжений. Границами областей являются узлы, смежные с узлами класса напряжения данной области.

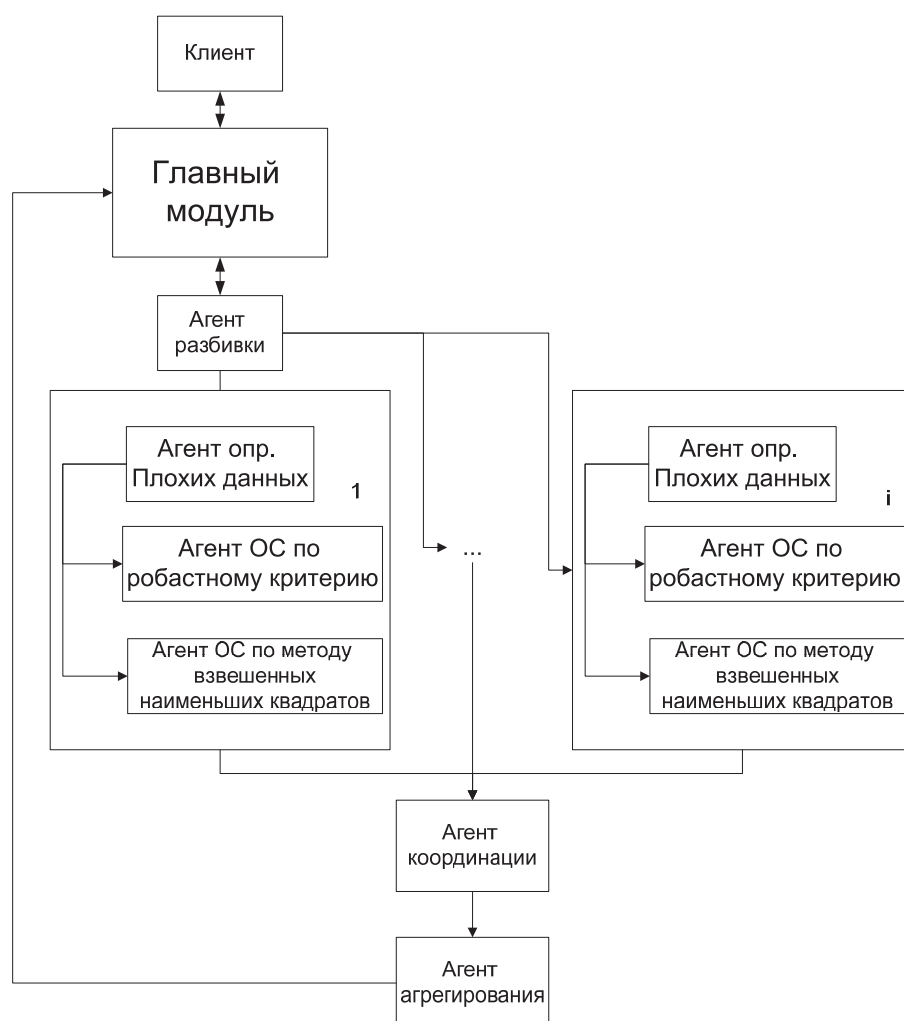


Рис. 6. Схема взаимодействия агентов в многоагентной системе оценивания состояния ЭЭС

Fig. 6. Diagram of agent relation in multi-agent system for estimating the state of electric power system

Так, для области класса напряжения 750–500 кВ граничными являются узлы напряжением 220 кВ, и наоборот.

Далее каждая из полученных схем распределяется между агентами оценивания состояния и рассчитывается параллельно. Расчет начинается с области самого высокого уровня напряжения (750–500 кВ) для каждой подсистемы первого уровня декомпозиции. Как правило, эта часть схемы хорошо обеспечена телеизмерениями высокой точности и содержит базисный узел. Алгоритм оценивания состояния по подсистемам с граничными узлами состоит в следующем:

- Для каждой области, включающей граничные узлы, решается задача обнаружения плохих данных методом контрольных уравнений.
- В случае обнаружения всех плохих данных или их отсутствия решается задача оценивания состояния методом взвешенных наименьших квадратов.
- В случае невозможности определения всех ошибочных телеизмерений, и соответственно невозможности обнаружения плохих данных, выполняется оценивание состояния с помощью робастного критерия (подавления плохих данных).
- Последовательно рассчитываются остальные фрагменты схемы, ранжированные по уровням напряжений (220, 110 кВ и т. д.), всякий раз в качестве базисного узла выбирается узел, граничный с областью более высокого уровня напряжений. Оценки граничных переменных

вектора состояния, полученные на верхнем уровне декомпозиции, фиксируются.

На следующем этапе все схемы необходимо вновь соединить в одну, однако для начала необходимо провести согласования данных в граничных узлах, этим занимается агент координации. Если согласование не было достигнуто, то в схему вносятся корректировки и вновь производится оценивание состояния. В случае если согласование достигнуто, схемы передаются агенту агрегации, который вновь объединяет их в исходную схему и возвращает клиенту.

Заключение

Выполнен обзор существующих на данный момент агентных решений, выделены их области применения и указаны их недостатки. Предложен подход к разработке многоагентных систем, позволяющий избавиться от этих недостатков, который включает в себя: межплатформенное взаимодействие агентов в локальной сети через протоколы TCP/IP, обмен данными посредством XML-сообщений, а также возможность добавлять в систему новых агентов и редактировать существующие алгоритмы при помощи агентных сценариев, задаваемых пользователями-энергетиками. В настоящее время предложенный подход тестируется на практике при создании многоагентной системы оценивания состояний ЭЭС [19].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-07-01284, 13-07-00140, 14-07-00116, № 15-57-04074 Бел_мол_а а также грантов Программы Президиума РАН № 229.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Голуб И.И., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. Оценивание состояния в электроэнергетике – М.: Наука, 1983. – 302 с.
2. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
4. Phadke G. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. – 2002. – № 1. – С. 476–479.
5. Гальперов В.И., Колосок И.Н., Массель Л.В., Пальцев А.С. Постановка задачи разработки мультиагентной системы для оценивания состояний ЭЭС с учетом структурной и функциональной декомпозиции. // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XVIII Байкальской Всеросс. конф. Ч. III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – С. 231–234.
6. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. – 1996. – № 1. – С. 44–59.
7. Городецкий В.И. Многоагентные системы: основные свойства и модели координации поведения // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – № 1. – С. 22–34.
8. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 1408 с.
9. Многоагентные системы. 2009–2014. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/multiagent-systems.html> (дата обращения: 02.09.2014).
10. AnyLogic. Многоподходное имитационное моделирование // AnyLogic. URL: <http://www.anylogic.ru/features> (дата обращения: 02.09.2014).
11. Odell J., Giorgini P., Muller J.P. Agent-Oriented Software Engineering // 4th International Workshop, AOSE 2003. – New York, USA, July 2003. – P. 47–59.
12. Bresciani P., Giorgini P., Henderson-Sellers B., Low G. Agent-Oriented Information Systems II // 6th International Bi-Conference Workshop, AOIS 2004. Riga, Latvia, June 8, 2004; New York, USA, July 20, 2004. – P. 110–124.
13. Extending Web Services Technologies: the Use of Multi-Agent Approaches / L. Cavedon, Z. Maamar, D. Martin, B. Benatallah // Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations. – New York: Springer US, 2004. – P. 29–52.
14. Фаргышев Д.А., Черноусова Е.С., Черноусов А.В. Подход к разработке многоагентной распределенной интеллектуальной информационной системы для исследований в энергетике // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. Спец. выпуск 1. – С. 108–115.
15. Фаргышев Д.А., Черноусов А.В. Методы использования Web-сервисов для построения вычислительной ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Тр. XII Байк. Всеросс. конф. Ч. 2. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. – С. 46–54.

16. FIPA Abstract Architecture Specification. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (дата обращения: 07.09.2014).
17. JAVA Agent Development Framework / Jade. 2015. URL: <http://jade.tilab.com/> (дата обращения: 02.09.2014).
18. Poslad S., Buckle P., Haddingham R. The FIPA-OS agent platform: Open Source for Open Standards // Proc. of PAAM 2000. – Manchester, UK, 2000. – P. 355–368.
19. Гальперов В.И. Применение многоагентного подхода для разработки программных систем оценивания состояния ЭЭС // Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Вып. 44. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 165–170.
20. Колосок И.Н., Пальцев А.С. Двухуровневый иерархический алгоритм оценивания состояния ЭЭС и его реализация на основе мультиагентного подхода // ЭНЕРГОСИСТЕМА: управление, конкуренция, образование: Сб. докладов III Международ. научно-практ. конф. Т. 1. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008. – С. 354–359.

Поступила 10.09.2014 г.

UDC 004.89

DEVELOPMENT OF MULTI-AGENT SYSTEMS FOR DISTRIBUTED SOLUTIONS OF ENERGY PROBLEMS USING AGENT-BASED SCENARIOS

Ludmila V. Massel,

Dr. Sc., Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.
E-mail: massel@isem.sei.irk.ru

Vasilii I. Galperov,

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.
E-mail: galperov@gmail.com

On the one hand, the relevance of the research is defined by the evolving concept of the Smart Grid, which important aspect is the usability of the multi-agent technologies. And on the other hand the relevance is defined by a few number of practical approaches to implementation of multi-agent system. Electrical power system function and management nowadays require the development of a big sized model. Such models are not fully observable: there can be data corruption and bad synchronization. As a result, experts can make wrong decisions. To solve this problem we need to create new methods and software for state evaluation.

The main aim of the research is to provide an overview of current agent solutions on IT market; to analyze the cons of the existing systems and to offer an agent scenario based approach for developing multi-agent systems to solve energy problems that will avoid these cons.

Research method. Nowadays the agent approach is not used for developing the systems that solve the problems in electrical energy industry or estimate electrical power system condition in particular. The proposed approach for developing a multi-agent system should allow interaction of agents, created on different program platforms, and also creating new and editing existing algorithms in the system by agent scenarios.

Results. The authors have developed the approach for creating a multi-agent system to estimate the electric power system state with the support of cross-platform interactions and agent scenarios. The approach was tested and a system for estimating electrical power system condition is being developed now.

Key words:

Agent, multi-agent systems, estimation of EPS state, agent-based scenarios, Smart Grid.

The research was partially financially supported by the RFBR grants no. 15–07–01284, 13–07–00140, 14–07–00116, № 15–57–04074 Bel_mol_a as well as the grants of the RAS Presidium program no. 229.

REFERENCES

1. Gamm A.Z., Gerasimov L.N., Golub I.I., Grishin Yu.A., Kolosok I.N. *Otsenivanie sostoyaniya v elektroenergetike* [State estimation in electric power]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 302 p.
2. Gamm A.Z. *Statisticheskie metody otsenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskikh sistem* [Statistical methods for state estimation of electric power systems]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 220 p.
3. Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [Innovative development of electric power based on Smart Grid concept]. Moscow, IATs Energiya, 2010. 208 p.
4. Phadke. G. Synchronized Phasor Measurements. A Historical Overview. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, 2002, no. 1, pp. 476–479.
5. Galperov V.I., Kolosok I.N., Massel L.V., Paltsev A.S. *Postanovka zadachi razrabotki multiagentnoy sistemy dlya otsenivaniya sostoyaniy EES s uchetoм strukturnoy i funktsionalnoy dekompozitsii* [Development of a multiagent system for power grid state estimation including structural and functional decomposition]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: Trudy XVIII Baykalskoy Vserossiyskoy konferentsii. Ch. III* [Information technology and mathematical science and management. Proc. of the Baikal

- XVIII All-Russian Conference. P. III]. Irkutsk, ISEM SB RAS, 2013. pp. 231–234.
6. Gorodetskiy V.I. Mnogoagentnye sistemy: sovremennoe sostoyaniye issledovaniy i perspektivy primeneniya [Multi-agent systems: current state and perspectives of research]. *AI News*, 1996, no. 1, pp. 44–59.
7. Gorodetskiy V.I. Mnogoagentnye sistemy: osnovnye svoystva i modeli koordinatsii povedeniya [Multi-agent systems: the basic properties of the model and the coordination of behavior]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy – Information technology and computer systems*, 1998, no. 1, pp. 22–34.
8. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. Translated from English. Moscow, Publishing House «Williams», 2006. 1408 p.
9. Mnogoagentnye sistemy [Multi-agent systems]. Available at: <http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/multi-agent-systems.html> (accessed: 02 September 2014).
10. Mnogopodkhodnoe imitatsionnoe modelirovanie [Multimethod Simulation Software]. *AnyLogic*. Available at: <http://www.anylogic.ru/features> (accessed: 02 September 2014).
11. Odell J., Giorgini P., Muller J.P. Agent-Oriented Software Engineering. *4th International Workshop, AOSE 2003*. New York, USA, July 2003. pp. 47–59.
12. Bresciani P., Giorgini P., Henderson-Sellers B., Low G. Agent-Oriented Information Systems II. *6th International Bi-Conference Workshop, AOIS 2004*. Riga, Latvia, June 8, 2004; New York, USA, July 20, 2004. pp. 110–124.
13. Cavedon L., Maamar Z., Martin D., Benatallah B. Extending Web Services Technologies: the Use of Multi-Agent Approaches. *Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations*. New York, Springer US, 2004. pp. 29–52.
14. Fartyshev D.A., Chernousova E.S., Chernousov A.V. Podkhod k razrabotke mnogoagentnoy raspredelennoy intellektual'noy informatsionnoy sistemy dlya issledovaniy v energetike [Approach to the development of multi-agent distributed intelligent information systems for research in energy]. *Computational Technologies*, 2008, vol. 13, Special Iss. 1, pp. 108–115.
15. Fartyshev D.A., Chernousov A.V. Metody ispolzovaniya Web-servisov dlya postroeniya vychislitelnoy IT-infrastruktury sistemnykh issledovaniy v energetike [Methods of using Web-services for construction of computing IT infrastructure systems studies in power engineering]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: Trudy XII Baykalskoy Vserossiyskoy konferentsii. Ch. 2* [Information and Mathematical Technologies in Science and Control. Proc. of Baikal All-Russian XII conference. P. 2]. Irkutsk, ISEM SB RAS, 2007. pp. 46–54.
16. FIPA Abstract Architecture Specification. Available at: <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html> (accessed: 07 September 2014).
17. JAVA Agent DEvelopment Framework. *Jade*. 2015. Available at: <http://jade.tilab.com/> (accessed: 02 September 2014).
18. Poslad S., Buckle P., Hadingham R. The FIPA-OS agent platform: Open Source for Open Standards. *Proc. of PAAM 2000*. Manchester, UK, 2000. pp. 355–368.
19. Galperov V.I. Primenenie mnogoagentnogo podkhoda dlya razrabotki programmnykh sistem otsenivaniya sostoyaniya EES [Application of multi-agent approach to develop software systems of state estimation EPS]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: Trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN. Vyp. 44* [System Research in Energy. Proc. of Young Scientists ESI SB RAS. Iss. 44]. Irkutsk, ESI SB RAS, 2014. pp. 165–170.
20. Kolosok I.N., Paltsev A.S. Dvukhurovnevny ierarkhicheskiy algoritm otsenivaniya sostoyaniya EES i ego realizatsiya na osnove multiagentnogo podkhoda [A two-level hierarchical state estimation algorithm EES and its implementation based on multi-agent approach]. *ENERGOSISTEMA: upravlenie, konkurentsia, obrazovanie: Sbornik dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 1* [POWER SYSTEM: management, competition, education. International scientific-practical conference. Vol. 1]. Ekaterinburg, Ural State Technical University, 2008. pp. 354–359.

Received: 10 September 2014.

УДК 621.318.3

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОДНООБМОТОЧНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРУЖИННЫМ НАКОПИТЕЛЕМ

Мошкин Владимир Иванович,

канд. техн. наук, доцент, зав. каф. энергетики и технологии металлов
Факультета транспортных систем Курганского государственного университета,
Россия, 640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25. E-mail: wimosh@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания машин ударного действия с повышенными энергетическими и динамическими показателями для реализации различных импульсных технологий.

Цель работы: получение приближенным методом без решения нелинейного дифференциального уравнения движения расчетных выражений энергетических и динамических характеристик однообмоточного импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и на основе анализа полученных характеристик выявление особенностей исследуемой конструктивной схемы.

Методы исследования. В основу рекомендуемого в данной работе метода аналитического исследования положен принцип взаимности для электромеханических систем. Он позволяет приближенно и достаточно просто определить кинетическую энергию и динамическое тяговое усилие линейного электромагнитного двигателя по его статическим характеристикам. Эта энергия составляет половину разности между интегральной работой электромагнитного двигателя и энергией, связанной с противодействующим усилием. Теоретические исследования подтверждены экспериментально.

Результаты. Полученные расчетные выражения основных энергетических и динамических характеристик позволяют выявить возможности исследуемой конструктивной схемы однообмоточного импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и в дальнейшем сравнить между собой различные конструктивные схемы с однообмоточными двигателями при проектировании электромагнитных приводов. При работе электромагнитного двигателя в режиме непрерывных ходов теоретически выявлены предельные частота ходов и ударная мощность, которые ограничивают производительность машины для реализации импульсных технологий. Установлены условия безударного холостого хода. Проанализированы преимущества и недостатки конструктивной схемы импульсного линейного электромагнитного двигателя с пружинным накопителем. Благодаря возможности получения безударного холостого хода исследуемая конструктивная схема с пружинным накопителем может найти применение в качестве электромагнитного привода, например, в вакуумных выключателях, тогда как наиболее распространенная конструктивная схема такого же электромагнитного двигателя с возвратной пружиной не способна обеспечить безударный холостой ход привода, и поэтому менее эффективна.

Ключевые слова:

Импульсный линейный электромагнитный двигатель, электропривод, энергия удара, пружинный накопитель, якорь, тяговое усилие.

К настоящему времени накоплен опыт теоретических, экспериментальных и эксплуатационных исследований импульсных линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) в составе машин для импульсных технологий, свидетельствующий о многообразии конструктивных схем, которые отличаются способом организации возвратно-поступательного движения якоря (бойка) [1–12].

В работе [13] получены энергетические и динамические характеристики одной из распространенных конструктивных схем однообмоточного ЛЭМД с возвратной пружиной. В такой схеме рабочий ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки, а холостой – с помощью возвратной пружины [14].

В составе машин для импульсных технологий также используется конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем энергии (рис. 1), обладающая рядом особенностей по сравнению со схемой с возвратной пружиной. В ней холостой ход совершается при участии электромагнитных сил обмотки двигателя с одновременным запасанием потенциальной энергии в сжатой накопительной пружине – 1 (рис. 1). Рабочий ход машины происходит за счет накопленной энергии этой пружины, а также гравитации.

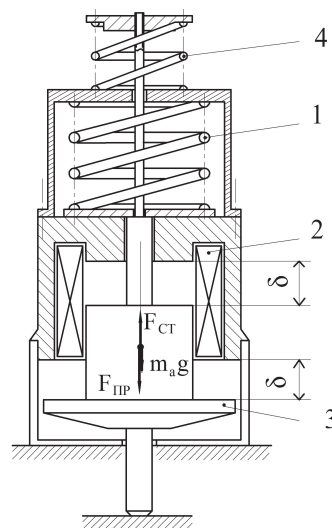


Рис. 1. Конструктивная схема однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем: 1 – накопительная пружина; 2 – обмотка возбуждения; 3 – якорь; 4 – вспомогательная пружина

Fig. 1. Schematic construction of a single-winding linear electromagnetic motor with a spring drive: 1 is the storage spring; 2 is the excitation winding; 3 is the anchor; 4 is the secondary spring

В работе [15] рассмотрены эти две конструктивные схемы однообмоточных ударных машин для погружения электродов в грунт и экспериментально получены их динамические характеристики, причём в этих схемах одна и та же пружина использована как для совершения холостого хода в первой из них, так и для рабочего хода во второй. Полученные таким образом динамические характеристики рассмотренных схем позволили сравнить их между собой. Однако экспериментальные динамические характеристики для рассмотренных схем получены при условии равенства конечных скоростей якоря как при рабочем, так и при холостом ходах. В этих случаях избыточная накопленная кинетическая энергия якоря при холостых ходах будет преобразовываться в шум и тепловые потери при работе двигателя, снижая его энергетические показатели и надёжность. В настоящей работе исследуется наиболее распространённый режим импульсного ЛЭМД, при котором конечные скорости якоря, в отличие от [15], существенно отличаются: при рабочих ходах они значительно выше, чем при холостых ходах.

Цель исследования – получить приближенным методом расчетные выражения энергетических и динамических характеристик однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем и на основе их анализа выявить возможности исследуемой конструктивной схемы. Будем считать, как и в [13, 15], что двигатель расположен вертикально, начальная скорость движения его якоря равна нулю, при холостом ходе машины противодействующее якорю усилие накопительной пружины $F_{\text{пр}}$ пропорционально его перемещению δ , характеристики питающего импульса напряжения и пружины неизменны, имеется соответствие окончания и появления тока в обмотке моментам остановки якоря, совершающего рабочий или холостой ход. Кроме того, в обесточенном состоянии обмотки – 2 и нижнем (исходном) по схеме на рис. 1 положении якоря – 3 его вес уравновешен вспомогательной пружинкой – 4. С её помощью устанавливают исходное положение якоря с усилием начального поджатия F_0 накопительной пружины, у которой жесткость c неизменна на всем перемещении якоря, массой пружин пренебрегаем.

Двигатели с такой конструктивной схемой используются в приводе машин прессового и штамповочного оборудования [8], ударных машин для погружения в грунт металлических электродов [15], в составе электромагнитного привода, например в вакуумных выключателях, отключение которых происходит за счёт потенциальной энергии, предварительно сжатой в период холостого хода накопительной пружины. При доработке этой конструктивной схемы накопительная пружина может работать как на сжатие, так и на растяжение, что обеспечит для привода, например, того же выключателя его безударный ход как на включение, так и на отключение.

Оценим энергетическую и динамическую эффективность рассмотренной конструктивной схемы, выразив кинетическую энергию якоря и его динамические характеристики. Для этого используем известное выражение (1) кинетической энергии якоря ЛЭМД, полученное с помощью принципа взаимности для электромеханических систем без учета потерь в магнитопроводе двигателя от перемещения и вихревых токов, а также потерь, связанных с преодолением сил трения [16–19]. Такое приближенное выражение позволяет найти кинетическую энергию A_k якоря двигателя по его статическим характеристикам – интегральной работе $A_{\text{и}}$ и работе $A_{\text{п}}$, связанной с противодействующим усилием:

$$A_k = 0,5(A_{\text{и}} - A_{\text{п}}). \quad (1)$$

С целью упрощения примем значения статического тягового усилия $F_{\text{ст}}(\delta)$ двигателя не зависящими от перемещения δ , тогда

$$A_{\text{е}} = \int_{\delta_i}^{\delta_e} F_{\text{НО}}(\delta) d\delta = F_{\text{НО}}(\delta_i - \delta_e) = F_{\text{НО}}\delta,$$

где $\delta_{\text{и}}$, $\delta_{\text{к}}$ – начальный и конечный рабочие зазоры; $\delta = \delta_{\text{и}} - \delta_{\text{к}}$.

Учитывая, что работа $A_{\text{п}}$, связанная с противодействующим усилием, для данной конструктивной схемы может быть представлена в виде двух слагаемых как $A_{\text{п}} = m_a g \delta + A_{\text{пр}}$, запишем с учётом (1) для этапа холостого хода двигателя выражение кинетической энергии якоря A_k :

$$A_{\text{е}} = 0,5(F_{\text{НО}}\delta - m_a g \delta - A_{\text{и}\delta}), \quad (2)$$

$$A_{\text{и}\delta} = \int_{\delta_i}^{\delta_e} F_{\text{и}\delta}(\delta) d\delta = 0,5c\delta^2 + F_0\delta, \quad (3)$$

где m_a – масса якоря; $A_{\text{пр}}$ – потенциальная энергия, запасаемая в накопительной пружине при ее деформации на величину перемещения δ под действием электромагнитных сил обмотки ЛЭМД; второе слагаемое $F_0\delta$ в выражении (3) учитывает энергию, связанную с усилием начального поджатия этой пружины. Тогда (2) с учетом (3) представим в виде:

$$A_{\text{е}} = 0,5m_a g \delta (F_{\text{НО}}^* - 1 - 0,5c_* - F_{0*}),$$

где $F_{\text{ст}}^* = F_{\text{ст}}/(m_a g)$ – относительное статическое тяговое усилие; $F_{0*} = F_0/(m_a g)$ – относительное усилие начального поджатия пружины; $c_* = c\delta/(m_a g)$ – относительная жесткость накопительной пружины.

Для нахождения динамической (движущей) силы тяги F_d импульсного ЛЭМД на этапе холостого хода машины представим кинетическую энергию якоря (2) в виде алгебраической суммы двух слагаемых:

$$A_{\text{е}} = \int_{\delta_i}^{\delta_e} F_{\text{а}}(\delta) d\delta - (A_{\text{и}\delta} + m_a g \delta), \quad (4)$$

где первое слагаемое характеризует вклад обмотки ЛЭМД в создание кинетической энергии якоря на

данном этапе, второе – уменьшение этой энергии и переход ее в потенциальные энергии пружины и положения якоря. Приравняв правые части (2) и (4), с учетом (3) получим в относительной форме интересное нас выражение динамической силы тяги двигателя:

$$F_{a*} = F_a / (m_a g) = 0,5(F_{\text{НО}*} + 0,5c_* + F_{0*} + 1). \quad (5)$$

Кинетическая энергия (энергия удара) A_y машины во время рабочего хода будет определяться потенциальными энергиями положения якоря и состояния пружины. При ограниченном перемещении δ получим выражение энергии $A_y = m_a g \delta + A_{\text{пр}}$, которое с учетом (3) примет вид:

$$A_0 = m_a g \delta (0,5c_* + F_{0*} + 1)$$

или в относительной форме:

$$A_{0*} = A_0 / (m_a g \delta) = 0,5c_* + F_{0*} + 1. \quad (6)$$

Как видно из (6), при неизменном перемещении δ энергия удара (кинетическая энергия) определяется жесткостью c пружины и усилием F_0 ее начального поджатия, то есть только параметрами пружины.

Если принять, что для этапа холостого хода машины при полностью возбуждаемом и равном δ перемещении якоря его кинетическая энергия A_k , определяющая выбег, должна к концу перемещения отсутствовать, то из (2) для $A_k=0$ получим:

$$F_{\text{НО}}\delta = m_a g \delta + A_{\text{то}},$$

откуда с учетом (3) получаем соотношение, связывающее энергию удара, статическую силу тяги, массу подвижных частей, жесткость и усилие начального поджатия пружины при условии $A_k=0$, то есть при условии безударного холостого хода:

$$F_{\text{НО}} = m_a g + 0,5c\delta + F_0$$

или в относительной форме:

$$F_{\text{НО}*} = 1 + 0,5c_* + F_{0*}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что каждому значению жесткости и усилия начального поджатия пружины и массы подвижных частей соответствует определенное значение статической силы тяги ЛЭМД, при котором выбег якоря отсутствует. Если это усилие $F_{\text{СТ}*} > 1 + 0,5c_* + F_{0*}$, то при ограниченном перемещении якоря избыток его кинетической энергии при холостом ходе машины будет преобразовываться в другие виды энергии, например в механическую при ударе якоря о детали конструкции ЛЭМД, и рассеиваться в тепло. Величина энергии удара при этом не изменится, однако КПД двигателя упадет, повысится шум и снизится надежность привода. Если $F_{\text{СТ}*} < 1 + 0,5c_* + F_{0*}$, то величина перемещения якоря станет меньше δ , а полезная энергия (например, энергия удара) понизится. Кроме того, для некоторых приводов необходимо обеспечить заданное перемещение δ , чтобы, например, взвести накопительную пружину. Для работоспособности исследуемой конструктивной схемы машины для импульсных технологий должно суще-

ствовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. Следовательно, регулировочные свойства такой конструктивной схемы ограничены верхним пределом, при котором полезная энергия будет неизменной.

Для исследуемой конструктивной схемы существуют области допустимых значений параметров в виде ограничений, для которых выполняется (7):

$$F_{0*} \geq 0; c_* \geq 1; F_{\text{СТ}*} > 1. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены зависимости относительных энергии удара A_{y*} и статического тягового усилия $F_{\text{СТ}*}$ ЛЭМД от жесткости пружины c_* , силы ее начального поджатия F_{0*} , полученные из выражений (6) и (7) и при условиях (8), причем минимальное значение конструктивного параметра $c_*=1$ обозначено кружочками.

Анализ этих зависимостей, имеющих линейный характер изменения, показывает, что с ростом жесткости пружины при неизменном значении силы начального поджатия необходимо повышать статическое тяговое усилие ЛЭМД, и энергия удара ЛЭМД также будет расти.

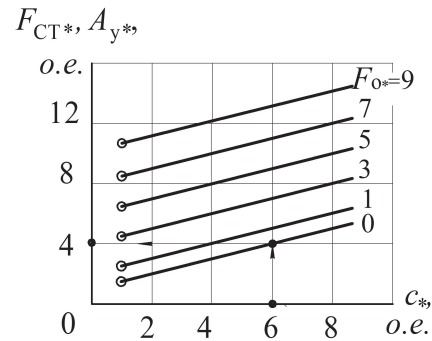


Рис. 2. Влияние жесткости возвратной пружины и усилия её начального поджатия на энергию удара и статическое тяговое усилие

Fig. 2. Influence of return spring stiffness and tension of its initial pressure on impact energy and static tractive force

По графикам рис. 2 или по (7) можно производить настройку конструктивной схемы: при заданных конструктивных параметрах c_* и F_{0*} легко определить необходимый режимный параметр $F_{\text{СТ}*}$ двигателя, например, при $c_*=6$ и $F_{0*}=0$ получим $F_{\text{СТ}*}=4$.

Динамические характеристики рассматриваемой машины будут определяться этапами рабочего и холостого ходов. Так как движение якоря происходит под действием падающей по перемещению силы, то на этапе холостого хода дифференциальное уравнение движения якоря ЛЭМД для рассматриваемой конструктивной схемы машины имеет следующий вид:

$$m_a \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_{\text{то}} - c\delta, \quad (9)$$

где $F_{\text{то}}$ – начальное значение силы, движущей якорь (динамической силы) на этапе холостого хода, которое с учетом (5) и для $\delta=0$ будет:

$$F_{i\dot{o}} = F_a = 0,5(F_{\dot{N}\dot{O}} + F_0 + m_a g).$$

Время движения при холостом ходе t_{xx} найдено в [20]:

$$t_{\dot{o}\dot{o}} = \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{F_{\dot{o}\dot{o}}}{F_{i\dot{o}}} \right), \quad (10)$$

где $F_{\dot{N}\dot{O}}$, $F_{\dot{K}\dot{K}}$ – начальное и конечное значения силы, движущей якорь при холостом ходе.

Решение уравнения движения для нашей конструктивной схемы на этапе холостого хода от $t=0$ до $t=t_{xx}$ при отсутствии затухания получено в [20]:

$$\begin{aligned} \delta(t) &= \frac{F_{i\dot{o}}}{c} + \frac{F_{i\dot{o}}}{c} \sin \left(\sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \delta_{i\dot{o}} + \delta_{i\dot{o}} \sin \left(\sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\delta_{i\dot{o}} = \frac{F_{i\dot{o}}}{c}$ – значение принужденной составляющей $\delta(t)$ для уравнения (9); $\sqrt{c/m_a}$ – собственная круговая частота колебаний якоря. Тогда закон изменения скорости движения якоря найдём после дифференцирования (11):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{F_{i\dot{o}}}{c} \sqrt{\frac{c}{m_a}} \cos \left(\sqrt{\frac{c}{m_a}} t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (12)$$

По условию в конечной точке при $t=t_{xx}$ скорость движения якоря должна быть равна нулю, следовательно, из (12) получим:

$$t_{xx} = \pi \sqrt{\frac{m_a}{c}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что время движения якоря на этапе холостого хода в явном виде не зависит от статического тягового усилия $F_{\text{ст}}$ импульсного ЛЭМД, а определяется только массой якоря и жесткостью накопительной пружины, хотя сам холостой ход совершается под действием этой силы $F_{\text{ст}}$. В действительности согласно уравнению (7), полученному для режима безударного холостого хода машины, статическая сила тяги должна быть согласована со свойствами пружинного накопителя (параметры F_0 и c). Поэтому время t_{xx} может быть выражено двояко: либо через тяговое усилие $F_{\text{ст}}$, либо без него. То же относится и ко времени рабочего хода $t_{\text{рх}}$, поскольку энергетически рабочий ход машины с рассматриваемой конструктивной схемой обусловлен предшествующим ему холостым ходом. Покажем это, представив, например, выражение (13) для t_{xx} с учетом (7) в относительной форме и приняв за базисную величину время T_1 свободного падения якоря с высоты δ :

$$T_1 = \sqrt{2\delta/g}.$$

Получим время холостого хода t_{xx} , выраженное через усилие $F_{\text{ст}}$:

$$t_{\dot{o}\dot{o}^*} = \frac{t_{xx}}{T_1} = \frac{\pi}{2\sqrt{F_{\dot{N}\dot{O}}^* - F_{0^*} - 1}}, \quad (14)$$

а затем через жесткость накопительной пружины:

$$t_{\dot{o}\dot{o}^*} = \frac{t_{xx}}{T_1} = \frac{\pi}{\sqrt{2c_*}}.$$

Подставив (13) в (10), получим значение конечной силы тяги $F_{\dot{K}\dot{K}} = -F_{\dot{N}\dot{O}}$, означающее, что якорь первую половину пути движется ускоренно, вторую – замедленно. На этапе холостого хода происходит «зарядка» пружинного накопителя.

На этапе рабочего хода, когда обмотка возбуждения импульсного ЛЭМД обесточена, дифференциальное уравнение движения якоря для рассматриваемой конструктивной схемы машины будет иметь вид, аналогичный (9):

$$m_a \frac{d^2\delta}{dt^2} = F_{i\dot{o}} - c\delta,$$

где $F_{\text{вр}} = c\delta + F_0 + m_a g$ – начальное значение движущей силы на этапе рабочего хода, обусловленное накопительной пружинной, усилием начального поджатия и гравитацией. Конечное значение движущей силы на этом этапе $F_{\text{кр}}$ определяется силой тяжести якоря и усилием начального поджатия пружины, то есть $F_{\text{кр}} = m_a g + F_0$. Тогда с учетом конечного $F_{\text{кр}}$ и начального $F_{\text{вр}}$ усилий, а также условия (7) время движения якоря при рабочем ходе $t_{\text{рх}}$ якоря также определим двумя способами из уравнения (10):

$$\begin{aligned} t_{\dot{o}\text{x}} &= \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\dot{N}\dot{O}}^* - 0,5c_*)} \right); \\ t_{\text{x}\dot{o}} &= \sqrt{\frac{m_a}{c}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (1 + F_{0^*})} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Представим выражения (15) для $t_{\text{рх}}$ и время цикла двигателя $t_{\text{ц}} = t_{xx} + t_{\text{рх}}$ в относительной форме соответственно:

$$\begin{aligned} t_{\dot{o}\dot{o}^*} &= \frac{t_{\text{рх}}}{T_1} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2c_*}} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\dot{N}\dot{O}}^* - 0,5c_*)} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{O}^*} &= \frac{t_{\text{O}}}{T_1} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2c_*}} \left(\frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{1}{1 + c_* / (F_{\dot{N}\dot{O}}^* - 0,5c_*)} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

На рис. 3 приведены построенные по (14) и (16) зависимости относительных времен холостого и рабочего ходов рассматриваемой машины от относительных значений жесткости пружины накопителя и статического тягового усилия ЛЭМД при условии (7), учитывающем начальное поджатие пружины. Кривые $t_{\text{рх}^*}$ для заданных значений же-

сткости c_* со стороны меньших значений $F_{СТ*}$ ограничены точками (кружочками на рис. 3), в которых значение усилия начального поджатия равно нулю и выполняется условие (7). Аналогично кривые $t_{х.х*}$ для заданных значений F_{0*} со стороны меньших значений $F_{СТ*}$ ограничены точками, в которых жесткость $c_*=1$ и выполняется условие (7). Анализ этих зависимостей указывает на большую в 2–5 раз продолжительность холостого хода, который выполняется с участием электромагнитного тягового усилия $F_{СТ}$, по сравнению с рабочим в диапазоне изменения жесткости c_* от 1 до 6–8. Так, для $c_*=8$ и $F_{0*}=0$ согласно (7) получим $F_{СТ*}=5$. Следовательно, низкое быстродействие ЛЭМД при холостом ходе по сравнению с рабочим объясняется невысоким значением развиваемого двигателем тягового усилия $F_{СТ*}$ для указанного диапазона жесткости c_* и при условии безударного холостого хода машины, что снижает динамические свойства данной конструктивной схемы.

Время рабочего хода при жесткости $c_*=const$ с ростом $F_{СТ*}$ падает ещё и за счёт роста усилия F_{0*} , так как запасаемая потенциальная энергия пружины за счет увеличения усилия начального поджатия также возрастает. По сравнению с холостым ходом рабочий ход совершается значительно динамичнее, поскольку он происходит при начальном движущем усилии, превосходящем конечное, что теоретически установлено в [20] и подтверждено экспериментально в [15]. Это обстоятельство удобно использовать для таких технологических операций, как, например, отключение вакуумных выключателей.

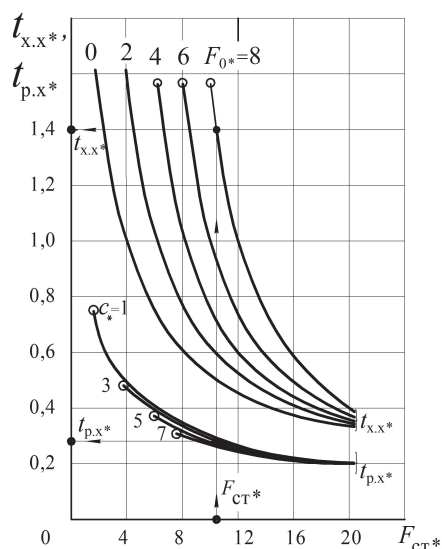


Рис. 3. Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на времена холостого и рабочего ходов

Fig. 3. Influence of spring stiffness and static tractive force on time of idle and operating strokes

При работе импульсного ЛЭМД в режиме непрерывных ходов определим относительную частоту ходов n_* в минуту, используя (17):

$$n_* = \frac{60}{t_{0*}} = \frac{60\sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{НО*} - 0,5c_*)}\right)}. \quad (18)$$

На рис. 4 представлены зависимости относительной частоты ходов в минуту, построенные по выражению (18) и при выполнении условия (7). Из них следует, что с ростом жесткости пружины c_* и тягового усилия $F_{СТ*}$ частота ходов машины также растет. При этом одну и ту же частоту ходов можно получить при определенных сочетаниях $F_{СТ*}$, c_* и F_{0*} .

Для конкретных рекомендаций по выбору рациональных значений параметров $F_{СТ*}$, c_* и F_{0*} необходимо привлечь дополнительные критерии оценки, например, постоянство энергии удара, ограничение кинетической энергии якоря в конце холостого хода и др.

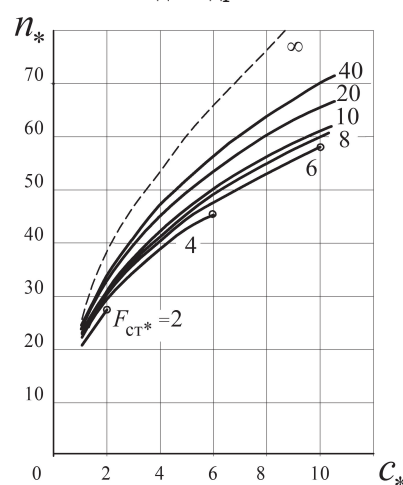


Рис. 4. Влияние жесткости пружины и статической силы тяги на частоту ходов

Fig. 4. Influence of spring stiffness and static tractive force on stroke frequency

Из анализа зависимостей (18), изображенных на рис. 4, следует вывод о существовании предельной частоты ходов рассматриваемой конструктивной схемы при заданных значениях энергии удара, статической силы тяги ЛЭМД, жесткости пружины или усилия ее начального поджатия. Попытка повышения частоты ходов, например, за счет увеличения частоты следования питающих обмотку ЛЭМД импульсов напряжения источника питания, приводит к снижению энергии удара, что наблюдалось в ходе экспериментов [13]. Резервом для повышения частоты ходов могут служить другие конструктивные схемы, например с двухобмоточным ЛЭМД [21].

На основе формул (6), (18) и с учётом (7) получим выражение относительной ударной мощности двигателя для режима непрерывных ходов:

$$P_{0*} = A_{0*}n_* = \frac{60F_{НО*}\sqrt{2c_*}}{\frac{3\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{1}{1 + c_* / (F_{НО*} - 0,5c_*)}\right)},$$

и представим его в виде семейства кривых функций параметров $F_{ст*}$ и c_* на рис. 5.

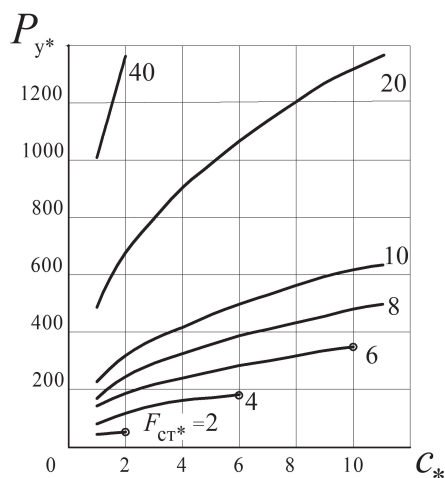


Рис. 5. Влияние жесткости пружины и статического тягового усилия на ударную мощность машины

Fig. 5. Influence of spring stiffness and static tractive force on impact machine capacity

Из анализа этих зависимостей следует, что ударная мощность машины растет с увеличением как статической силы тяги ЛЭМД, так и жесткости пружины накопителя. При этом существует для каждой совокупности параметров $F_{ст*}$, c_* и F_{0*} предельное значение ударной мощности машины, ограниченное точками, в которых $F_{0*}=0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1970. – 260 с.
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденция развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
3. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 12. – P. 651–652.
4. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor / V.Yu. Neyman, L.A. Neyman, A.A. Petrova, A.A. Skotnikov, O.V. Rogova // Russian Electrical Engineering. – 2011. – V. 82. – Iss. 6. – P. 328–331.
5. Ивашин В.В., Певчев В.П. Короткоходовой импульсный электромагнитный двигатель сейсмоисточника: монография. – Скарбрюккен, Германия: LAP – Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 157 с.
6. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors // Russian Electrical Engineering. – 2009. – V. 80. – Iss. 12. – P. 701–706.
7. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выборе конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы. Коллективная монография / под. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–170.

Машины, выполненные по рассмотренной конструктивной схеме, характеризуются ограниченной возможностью регулирования энергии удара с помощью устройства питания и управления из-за необходимости замены и регулирования пружины накопителя. При наличии фиксатора конструкция (рис. 1) позволяет сохранять механическую энергию после «зарядки» механического аккумулятора и использовать её, например, на объектах без электроснабжения [15].

Выводы

1. Полученные приближенные расчетные выражения энергетических и динамических характеристик позволяют выявить возможности конструктивной схемы однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем при условии безударного холостого хода и в дальнейшем сравнить между собой различные конструктивные схемы с однообмоточными двигателями при проектировании электромагнитных приводов.
2. Для работоспособности исследуемой схемы с пружинным накопителем и при условии безударного холостого хода должно существовать соответствие между параметрами пружинного накопителя и статическим тяговым усилием импульсного ЛЭМД. При работе в режиме непрерывных ходов существует предельная частота ходов и ударная мощность, которые ограничивают производительность импульсной машины.

8. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.
9. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
10. Линейный электромагнитный двигатель: пат. РФ № 2405237; заявл. 27.05.09; опубл. 27.11.10, Бюл. № 33.
11. Певчев В.П., Ивашин В.В. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: Монография. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
12. Ugarov G.G., Moshkin V.I., Massad A.K. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor / The International Journal of Engineering And Science (IJES). – 2014. – V. 3. Iss. 4. – P. 01–06.
13. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной // Вестник СГТУ. – 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 129–135.
14. Линейный электромагнитный двигатель с удержанием якоря: пат. РФ на полезную модель № 59342; заявл. 31.07.06; опубл. 10.12.06, Бюл. № 34.
15. Усанов К.М., Каргин В.А., Трубенкова И.В. Динамическая эффективность однообмоточных электромагнитных ударных машин с различными рабочими циклами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 12 (74). – С. 67–70.
16. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.

17. Ольсон Г. Динамические аналогии. – М: Изд-во иностр. лит., 1947. – 291 с.
18. Милых А.Н., Шидловский А.К. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике. – Киев: Наукова думка, 1967. – 316 с.
19. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Использование принципа взаимности при исследовании и расчёте энергетических характеристик линейных электромагнитных двигателей // Задачи динамики электрических машин. – Омск: Изд. ОмПИ, 1988. – С.120–128.
20. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. О рациональной форме движущих сил, заданных как функции перемещения. – Курган: Курган. машиностр. ин-т, 1984. – 15 с. – Информэлектро, № 318 эт-84.
21. Электромагнитный пресс: пат. РФ № 2026792; заявл.19.06.90; опубл. 20.01.95, Бюл. № 2.

Поступила 19.01.2015 г.

UDC 621.318.3

ENERGY AND DYNAMIC EFFICIENCY OF SINGLE-WINDING LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTORS WITH A SPRING DRIVE

Vladimir I. Moshkin,

Cand. Sc., Kurgan State University, 25, Gogol street, Kurgan, 640669, Russia.

E-mail: wimosh@mail.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop the impact machines with the raised power and dynamic indicators for implementing various pulse technologies.

The main aim of the research is to obtain the calculation expressions of power and dynamic performance of single-winding pulsed linear electromagnetic motors with spring energy store using the approximate method without solving nonlinear differential equations of motion under condition of unaccented idling; to identify the features of the constructive scheme based on the analysis of the characteristics obtained.

Research methods. The principle of reciprocity is the basis for a method of analytical research recommended in the work for electro-mechanical systems. It allows approximately and rather easy defining kinetic energy and dynamic traction effort of the linear electromagnetic motor by its static characteristics. This energy makes a half of difference between integrated operation of electromagnetic motor and energy connected with counteracting effort. Theoretical researches are proved experimentally.

Results. The obtained design expressions of the main power and dynamic characteristics allow revealing the possibilities of the constructive scheme of a single-winding pulsed linear electromagnetic motor with a spring store under condition of unaccented idling and comparing various constructive schemes with the single-winding engines when designing electromagnetic drives. The authors theoretically revealed the frequency of courses and impact power which limit the productivity of pulsed machine at operation of electromagnetic motor in a mode of continuous courses and determined the conditions of unaccented idling. The paper analyzes the advantages and shortcomings of the constructive scheme of the pulsed linear electromagnetic engine with a spring store. Thanks to possibility of obtaining unaccented idling, the given constructive scheme with a spring store can be applied as the electromagnetic drive, for example, in vacuum switches. The most widespread constructive scheme of the same electromagnetic engine with a returnable spring is not capable of providing unaccented idling of the drive and therefore it is less effective.

Key words:

Pulsed linear electromagnetic motor, electric drive, impact energy, spring drive, anchor traction.

REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
2. Ugarov G.G., Neyman V.Yu. Tendentsiya razvitiya i primeneniya ruchnykh udarnykh mashin s elektromekhanicheskim preobrazovaniem energii [Trend of developing and applying portable impact machines with electromechanical energy transformation]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2002, no. 2, pp. 37–43.
3. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Comparison of geometrically similar electromagnet systems by means of the constancy condition of heat criterion. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, Iss.12, pp. 651–652.
4. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, Iss. 6, pp. 328–331.
5. Ivashin V.V., Pevchev V.P. *Korotkokhodovoy impulsny elektromagnitnyy dvigatel seysmoistochnika: monografiya* [Short-stroke engine pulsed electromagnetic seismic source: Monograph]. Saarbrücken, Germany, LAP – Lambert Academic Publishing GmbH&Co.KG, 2011. 157 p.
6. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Limiting power characteristics of direct-current electromagnetic motors. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, Iss. 12, pp. 701–706.
7. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the issue of simplification of procedure and selection of structural schemes of electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NGTU Publ., 2004. pp. 155–170.

8. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Lvitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
9. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitny privod lineynykh mashin* [Electromagnetic drive linear machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
10. Neyman V.Yu., Smirnova Yu.B., Petrova A.A., Evreinov D.M. *Lineyny elektromagnitnyy dvigatel* [A linear electromagnetic motor]. Patent RF, no. 2405237, 2009.
11. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkikh impul'snykh elektromagnitnykh dvigateley* [Designing powerful short-pulsed electromagnetic motors: Monograph]. Tolyatti, TGU Press, 2012. 142 p.
12. Ugarov G.G., Moshkin V.I., Massad A.K. The Influence of Holding Device Anchor Parameters on the Holding Force Magnitude of an Integrated Linear Electromagnetic Motor. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, Iss. 4, pp. 01–06.
13. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Energeticheskaya i dinamicheskaya effektivnost' odnoobmotochnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley s vozvratnoy pruzhinoy [Power and dynamic efficiency of linear electromagnetic engines with one winding and the returnable spring]. *Vestnik SGTU*, 2012, no. 2 (66), Iss. 2, pp. 129–135.
14. Moshkin V.I., Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. *Lineyny elektromagnitnyy dvigatel s uderzhanem yakorya* [Linear electromagnetic motor with holding anchors]. Patent RF, no. 59342, 2006.
15. Usanov K.M., Kargin V.A., Trubenkova I.V. Dinamicheskaya effektivnost' odnoobmotochnykh elektromagnitnykh udarnykh mashin s razlichnymi rabochimi tsiklami [Dynamic efficiency of electromagnetic two-winding drum machines with different operating cycles]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2010, no. 12 (74), pp. 67–70.
16. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [DC electromagnets]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960. 446 p.
17. Olson G. *Dinamicheskie analogii* [Dynamic analogy]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1947. 291 p.
18. Milyakh A.N., Shidlovskiy A.K. *Printsip vzaimnosti i obratimost' yavleniy v elektrotekhnike* [The principle of reciprocity and reversibility of phenomena in electrical engineering]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967. 316 p.
19. Moshkin V.I., Ugarov G.G. *Ispolzovanie printsipa vzaimnosti pri issledovanii i rashchete energeticheskikh kharakteristik lineynykh elektromagnitnykh dvigateley* [Using the principle of reciprocity when studying and calculating the energy performance of linear electromagnetic motors]. *Zadachi dinamiki elektricheskikh mashin* [Problems of electric machine dynamics]. Omsk, OmPI Press, 1988. pp. 120–128.
20. Moshkin V.I., Ugarov G.G. *O ratsionalnoy forme dvizhushchikh sil, zadannykh kak funktsii peremeshcheniya* [About the rational form of the driving forces specified as a function of displacement]. Kurgan, 1984. 15 p. Informelektro, no. 318, et-84.
21. Maer E.F., Batalov A.G., Moshkin V.I., Popov I.P. *Elektromagnitnyy press* [Electromagnetic press]. Patent RF, no. 2026792, 1995.

Received: 19 January 2015.

УДК 622.34:550.4(071.16)

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД РАЙОНА БАКЧАРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Шайхиев Ильдар Рафаилович,

и.о. начальника отдела промышленной безопасности
ОАО «Томскгазстрой», Россия, 634009, г. Томск, ул. Большая Подгорная, 21.
E-mail: lldar.shaihieiev@mail.ru

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, д. 30. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

В настоящее время ввод Бакcharского месторождения в эксплуатацию приведет к значительным изменениям состояния геологической среды. Состояние геологоразведочных работ, по геолого-экономической оценке, и начало промышленного освоения Бакcharского железорудного узла позволяют утверждать, что на данной территории имеет место быть формирование природно-техногенной системы на начальном этапе развития. Соответственно, имеется возможность её исследовать. На фоне этого возрастает ценность современной информации, характеризующей естественную своеобразную природную среду, особенно в труднодоступных районах. Необходимость выполнения полной оценки современного геоэкологического состояния природной среды на Бакcharском железорудном месторождении, выявление основных природных и техногенных факторов, формирующих эколого-геологическую обстановку исследуемого района и вовлекаемых в промышленное освоение ресурсов, определяют актуальность проводимых исследований.

Цель работы: оценить эколого-геохимическое состояние территории Бакcharского района по данным комплексного изучения природных сред на начальной стадии развития природно-техногенной системы, связанной с предполагаемой отработкой Бакcharского железорудного месторождения.

Методы и виды исследований: нейтронно-активационный анализ, эмиссионно-спектральный полуколичественный анализ, атомно-геохимические (отбор проб снегового покрова), литогеохимические (отбор проб почвенного покрова), гидрогеохимические (отбор проб поверхностных и подземных вод), гидролитогеохимические (отбор проб донных отложений), биогеохимические (изучение биосубстрата – волосы детей), радиогеохимические исследования (измерение мощности экспозиционной дозы, а также содержание U, Th и K).

Результаты. На основе проведенных геохимических исследований дается геохимическая характеристика природных сред (почва, пылеаэрозоли, донные отложения, поверхностные и подземные воды, биосубстрат), которая позволит оценить изменение состояния окружающей среды в районе предполагаемой отработки месторождения и использовать эти данные для организации мониторинга.

Ключевые слова:

Эколого-геохимический мониторинг, почва, пылеаэрозоли, донные отложения, поверхностные и подземные воды, биосубстрат, месторождение, железная руда.

Введение

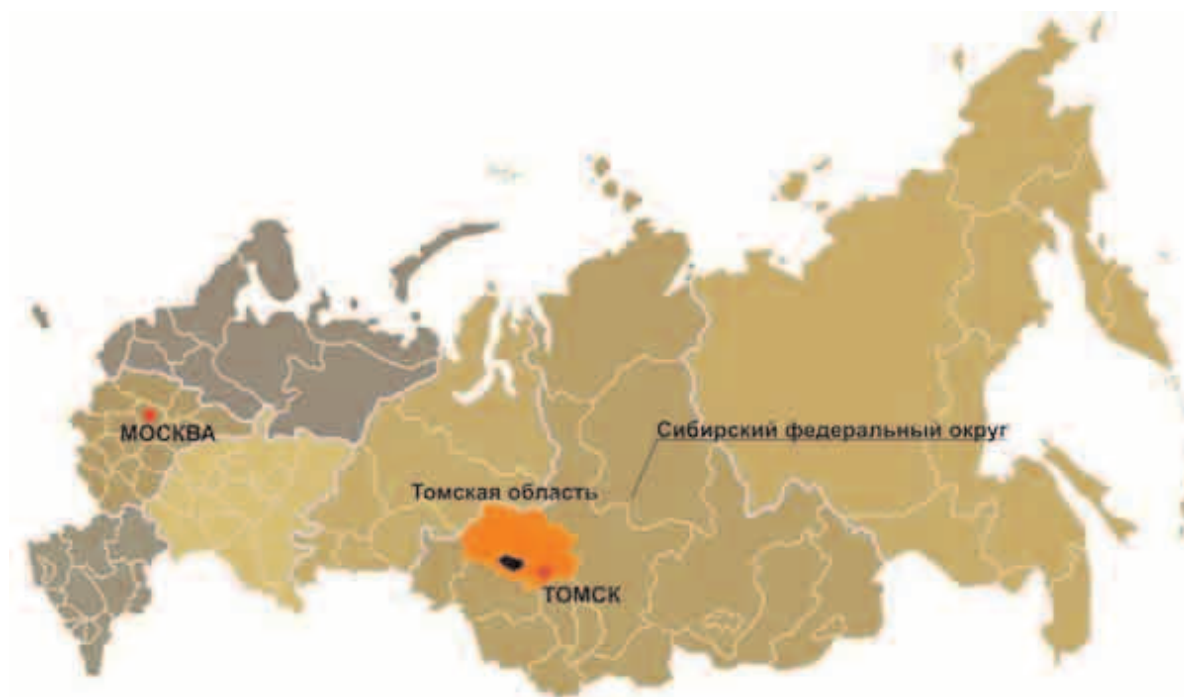
Целью выполнения исследований являлась оценка эколого-геохимического состояния природных сред Бакcharского железорудного узла на стадии начального освоения железорудного месторождения (начальная стадия формирования природно-техногенной системы). Его отработка повлечет за собой изменение природных сред в зоне предполагаемого функционирования природно-техногенной системы. Поэтому выполнение комплексных исследований на начальной стадии развития является весьма актуальным.

Бакcharский рудный узел, являющийся составной частью Западносибирской железорудной провинции, расположен в Бакcharском административном районе в 200 км к западу от г. Томска. Площадь его около 1200 км² (рис. 1). Прогнозные ресурсы проявления различными исследователями оцениваются примерно от 18,3 [1] до 28 млрд т по категориям P1+P2 [2]. По оценке [3] прогнозные

ресурсы составляют 28,6 млрд т по категории P1 и по категории P2 – 23,6 млрд т. Рудоносная толща по времени формирования занимает промежуток от турона до эоцена и с несогласием залегает на морских песчано-глинистых отложениях кузнецовской свиты (сеноман-турон).

Перекрывается она морскими глинистыми отложениями люлинворской свиты (эоцен). Продуктивные отложения Бакcharского проявления приурочены к трем стратиграфическим уровням – песчаным толщам позднемиоценового, палеоэоценового и эоценового возраста: Нарымскому (сантон), колпашевскому (маастрихт) и бакcharскому (палеоэоцен) горизонтам.

Оолитовые железные руды отнесены к трем горизонтам (снизу-вверх): нарымскому, колпашевскому и бакcharскому. Руды залегают горизонтально с едва заметным погружением их к востоку и северу. Железорудная толща Бакcharского месторождения представлена восемью пространственно разбобненными рудными телами [2].



Врезка в карту РФ (Бакcharское железорудное месторождение)
Inset to the map of the RF (Bakchar iron-ore deposit)



Рис. 1. Обзорная карта района Бакcharского месторождения: А) Западный участок; Б) Полюнянский участок

Fig. 1. General map of Bakchar deposit: A) Zapadny area; B) Polynynsky area

Химический состав руд Бакcharского рудопроявления зависит, в основном, от количественного соотношения рудных и нерудных минералов, от состава рудных минералов и цемента. Содержание

железа в рудах тем больше, чем меньше в них терригенного материала и глинистого цемента. В прямой зависимости от количества железа находится содержание фосфора и ванадия.

Сцементированные руды бакчарского горизонта: рудные тела Б1, Б3 имеют наиболее высокое содержание железа: 37,01 % (максимальное – 44,15 %), в сыпучих рудах тел Б2, Б4 35,24 % (максимальное – 45,45 %). Распределение железа в горизонтальном направлении выдержано на больших площадях. Наиболее богаты железом руды оценочного участка (39,07–43,67 % – сцементированные руды, 32,5–38,73 % – сыпучие). Основное количество железа присутствует в рудах в окисной форме и связано с гетитом и гидрогетитом оолитов и цемента. Незначительная доля железа составляет закись и связана с сидеритом и хлоритом цемента.

Для сцементированных руд бакчарского горизонта рудных тел Б1 характерно относительно высокое содержание двухвалентного железа (4,37–26,90 %) и потерь при прокаливании (9,02–20,90 %). Повышенное их количество отмечается в рудах с сидеритовым цементом. Содержания СаО (0,34–1,41 %) и MgO (0,51–1,49 %) остаются почти постоянными и незначительными, так как в этих рудах присутствуют почти чистые сидериты. Характерными являются низкие содержания глинозема (2,50–9,65 %), более низкие, чем в других рудах, очевидно, потому, что количество глинистого материала и хлорита в них незначительно. Содержание ванадия невысокое и составляет в среднем 0,14 % [2–4].

Соотношение железа и кремнезема здесь так же, как в нарымском и колпашевском горизонте, находится в обратной корреляционной зависимости. В прямой зависимости от содержания железа находятся содержания ванадия и фосфора. По всей вероятности, оба этих элемента изоморфно входят в состав гидрогетитовых оолитов. Содержание серы по данным химического анализа незначительно и составляет 0,10–0,45 %.

На наиболее изученном участке, по данным 9 скважин, средняя мощность рудоносной залежи продуктивного бакчарского горизонта составляет 25,7 м при среднем содержании железа 37,4 % и средней мощности перекрывающих пород 191 м. Лабораторные опыты по обогащению руд обжиг-магнитным методом позволили получить концентраты с содержанием железа 53–61 % при извлечении 91,3–95,8 %. В офлюсованном агломерате железо составляет 49–51 %, мышьяк 0,021–0,052 %, фосфор от 0,13 % в рудах до 0,34 % в гидрогетитовых оолитах [5].

Все руды делятся на две группы: сыпучие и сцементированные. Внутри группы выделяются типы по минеральному составу цемента:

І. Оолитовые сыпучие руды: руда гидрогетитовая оолитовая сыпучая с гидрогетито-глинистым цементом. Минеральные компоненты (%): гидрогетит 55–60, сидерит 1–5, кварц 10–15, глинистые минералы 15–20.

ІІ. Оолитовые сцементированные руды: а) руда гидрогетитовая оолитовая, крепко сцементированная сидеритовым цементом. Минеральные компо-

ненты (%): гидрогетит 30–35, сидерит 30–35, глинистые минералы (хлорит, гидромусковит) 25–30, кварц 5–10; б) руда гидрогетитовая оолитовая слабо сцементированная хлорито-глинистым цементом. Минералогический состав: присутствует железистый хлорит, и примесь глинистых минералов, среди которых постоянно присутствует гидрослюда с подчиненным количеством каолина; в) руда гидрогетитовая оолитовая с гидрослюдистым цементом. Минеральные компоненты (%): гидрогетит 45–50, сидерит 5–10, глинистые минералы 25–30, кварц 10–15; г) руда гидрогетитовая оолитовая с сидерит-хлоритовым цементом. Минеральные компоненты (%): гидрогетит 40–45, сидерит 5, глинистые минералы 25–30, кварц 15–20 [5].

Необходимость отработки месторождения очевидна по многим вполне объективным причинам. В непосредственной близости расположен Западно-Сибирский металлургический комбинат в г. Новокузнецк, который готов использовать добываемую руду.

Вовлечение в промышленную отработку руд Бакчара благоприятно отразится на экономике региона, но повлечет за собой изменение природных сред в зоне предполагаемого функционирования природно-техногенной системы (ПТС). Поэтому выполнение комплексных исследований на начальной стадии развития ПТС является весьма актуальным.

Горно-геологические условия

Бакчарский рудный узел представляет собой один из наиболее перспективных и относительно изученных участков Западно-Сибирского железорудного пояса. Его руды залегают в породах мел-палеогенового возраста на глубинах 180...250 м. Мощность продуктивного железорудного пласта составляет 35...40 м, содержание железа от 35 до 45 %, плотность руд около 2,2 см³, прочность 0,5...5 по шкале [6]. Часть ресурсов представлена «рыхлыми» рудами, которые позволяют применять методы скважинной гидродобычи (СГД) с их попутным обогащением. Были проведены экспериментальные работы по СГД, которые показали удовлетворительный результат. Существует точка зрения о возможности добычи руд методом скважинного подземного выщелачивания [7], а также рассматривается вариант разработки рудного узла карьерным способом [8].

Ландшафтно-геохимические особенности территории

Территория Бакчарского района входит в Западно-Сибирскую провинцию южнотаяжской подзоны. Автоморфные почвы южной тайги Западной Сибири характеризуются рядом особенностей. Они проявляются в карбонатности почвообразующих пород, наличии признаков глееватости в нижней части профиля, сохранности реликтовых признаков почв в виде вторых гумусовых горизонтов.

Повсеместное проявление глееватости за счет почвенно-грунтовой верховодки обусловлено климатическими особенностями района (большое количество осадков, длительный холодный период, глубокое промерзание и медленное оттаивание почв), а также тяжелым механическим составом водоупорных горизонтов. Наиболее детальная классификация почв данного района приведена в работах К.А. Уфимцевой [9].

Все перечисленные почвы характеризуются своеобразным вещественным составом и свойствами. Основная часть территории занята дерново-глеевыми почвами разной степени переувлажнения и болотными почвами.

Общая заболоченность территории достигает 50 %. Широкому развитию процесса заболачивания способствует: а) избыточное увлажнение; б) плоский слаборасчлененный рельеф и отрицательные тектонические колебания поверхности; в) недостаточно развитая гидросеть с малыми уклонами русел; г) слабая водоотдача торфов [10].

В районе исследований выделяется 3 типа рельефа: 1) древняя озерная равнина среднечетвертичного возраста; 2) склон древней озерной равнины; 3) речные долины.

Материалы и методы исследований

Методы и виды исследований определялись с учетом конкретных природных и территориальных комплексов, ландшафтно-почвенных, геоморфологических, геохимических и других условий.

Всего было исследовано 78 проб почвенного и снегового покрова, 7 проб донных отложений, 7 проб поверхностных вод, 4 пробы подземных вод. Опробование почвенного и снегового покрова осуществлялось на Западном, Полынянском участках и населенных пунктах района (рис. 2, 3).

Пробы донных отложений отбирались для выяснения накопления в них химических элементов, отражающих геохимические особенности бассейнов водосбора (рис. 2, 3). Донные отложения района представлены преимущественно илистым, суглинистым, супесчаным материалом. В качестве сравнения мы использовали содержание элементов в байкальском иле (БИЛ-1).

Полученные материалы обрабатывались с использованием статистических программ Statistica 8, построение карт выполнялось с помощью программ Surfer 9 и Corel Draw X4.

В районе рудного объекта выполнен комплекс эколого-геохимических исследований, включающих в свой состав изучение почв, пылеаэрозолей снеговых планшетов, донных отложений, подземных и поверхностных вод (в незначительном объеме) и биосубстрата (волосы) (рис. 2, 3).

Отбор проб природных сред осуществлялся по ГОСТам и другим руководящим документам [11–16].

Анализ проб на содержание химических элементов (почва, донные отложения, твердый осадок снегового покрова) выполнялся посредством нейтронно-активационного анализа в ядерно-геохимической лаборатории на базе ядерного реактора

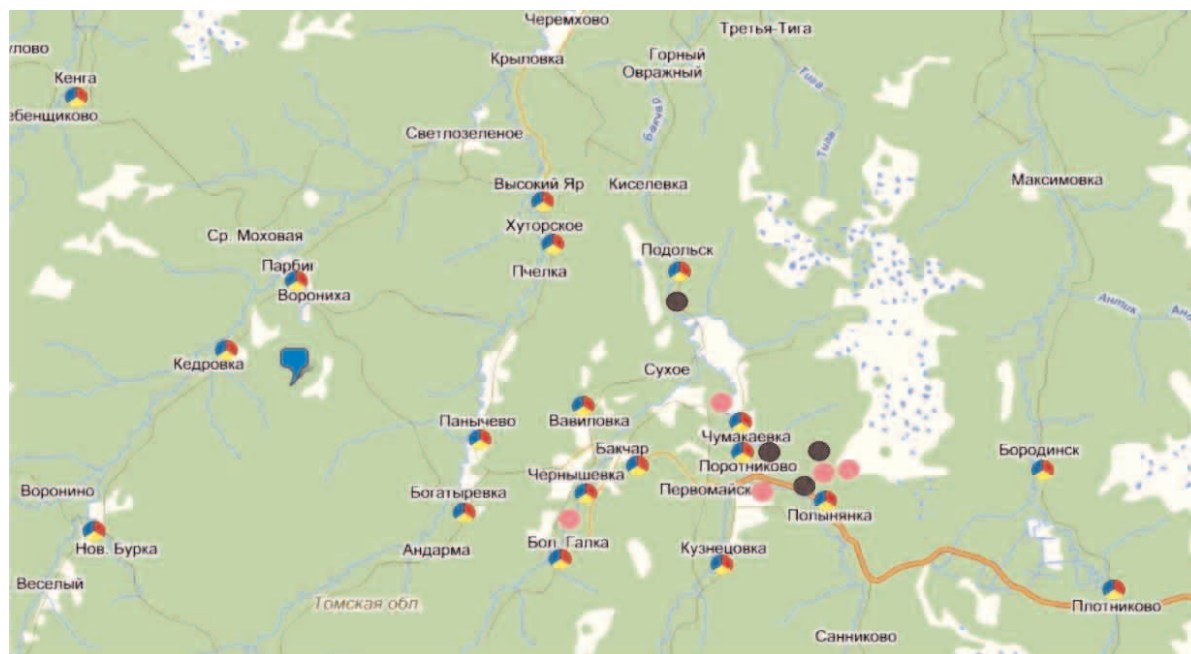


Рис. 2. Карта-схема геоэкологических исследований Бакcharsкого района

Fig. 2. Schematic map of geological and ecological surveys in Bakchar region

● – пробы почвенного покрова/soil cover samples; ● – пробы снегового покрова/snow cover samples; ● – радиогеохимические исследования/radio-geochemical researches; ● – пробы поверхностных вод и донных отложений/samples of surface waters and sediment; ● – пробы подземных вод/undeground water samples

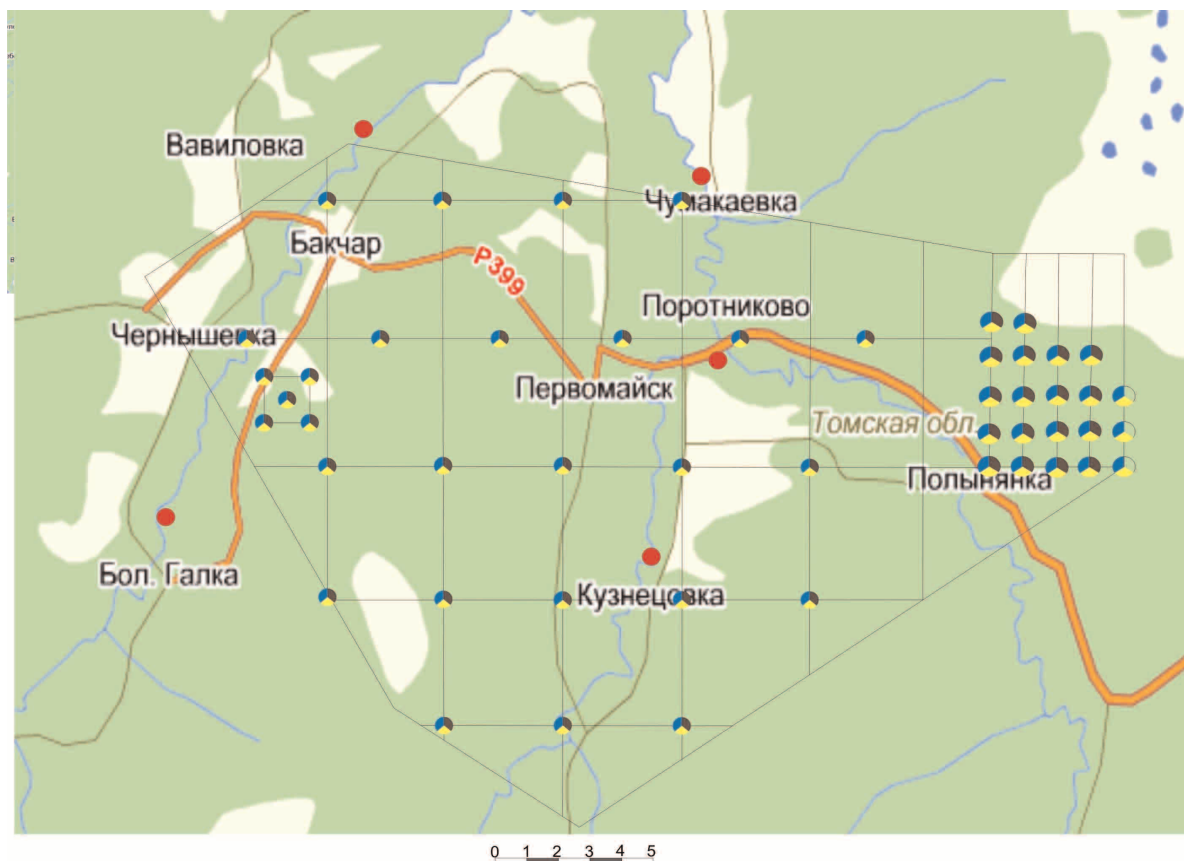


Рис. 3. Карта-схема геоэкологических исследований территории Бакcharского железорудного узла: А) Западный участок; Б) Полюнянский участок

Fig. 3. Schematic map of geological and ecological surveys in Bakchar iron-ore deposit: А) Zapadnya area; Б) Polynyan'sky area

● – пробы почвенного покрова/soil cover samples; ● – пробы снежного покрова/snow cover samples; ● – радиогеохимические исследования/radio-geochemical researches; ● – пробы поверхностных вод и донных отложений/samples of surface waters and sediment

Томского политехнического университета, под руководством ст. науч. сотр. кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета (ТПУ) А.Ф. Судыко. Для оценки качества анализа в процессе выполнения полевых радиогеохимических исследований использовалась аппаратура СРП 68–01, РКП 305.

В основу статьи положены результаты исследований, выполненных автором совместно с сотрудниками кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ на территории Бакcharского района с 2006 по 2007 гг.

Обсуждение полученных результатов

Почвы

Анализ этих данных показывает, что по значению коэффициента вариации ($V\%$) большинство химических элементов характеризуются: населенные пункты района (равномерным распределением, кроме Au , $V\% > 50$), Полюнянский участок (равномерным распределением, кроме Ca , Br , Sb , U , $V\% > 50$), Западный участок (равномерным распределением, кроме Sb и U , $V\% > 50$).

В табл. 1 приведены средние содержания редких, редкоземельных и других элементов в почвах на территории Бакcharского района.

Как видно из табл. 1, относительно локального фона («Заказник Томский», по данным [18], далее фон) почвы изученной территории характеризуются более высокими уровнями накопления практически всех изученных элементов, за исключением As , Sr и Ag .

Почвы Западного участка железорудного узла более обогащены химическими элементами (кроме Sb , Au , Eu , Lu) по сравнению с Полюнянским участком и Бакcharским районом в целом. Например, в них в 1,6 раз больше содержание Ba , в 1,4 раза содержание Fe при сравнении Западного и Полюнянских участков.

В целом в почвах Бакcharского района минимальное превышение над геохимическим кларком ноосферы (Глазовский Н.Ф., 1982 г., далее кларк) составляет минимальное для La – 2,45, максимальное – 12,06 раз для Ba .

В сравнении отношений различных редкоземельных элементов в целом по Бакcharскому району

Таблица 1. Среднее содержание элементов в почвах Бакcharского района (мг/кг, кроме Na, Ca, Fe в мас. %)**Table 1.** Average content of elements in soils of Bakchar region (mg/kg, Na, Ca, Fe in wt. %)

Элементы Elements	В целом по Бак- чарскому району (78 проб) In Bakchar region (78 samples)	Населенные пункты району (36 проб) Settlements of the region (36 samples)	Среднее в пределах железрудного узла (42 пробы) Average value within the iron-ore cluster (42 samples)	Полынянский участок (20 проб) Polynyansky area (20 samples)	Западный участок (22 пробы) Zapadny area (22 samples)	Кларк* Clark*	Фон** Background**	Почвы мира*** World soils***
Na	0,8±0,03	0,7±0,02	0,8±0,03	0,7±0,05	0,9±0,02	1,9	0,5	Н.д.
Ca	1,3±0,02	1,3±0,05	1,4±0,1	1,2±0,2	1,5±0,06	1,6	0,4	Н.д.
Sc	11,7±0,4	10,8 ± 0,3	12,1±0,4	10,2±0,6	14,1±0,2	7	8,3	Н.д.
Cr	97,6±3,7	94,6±2,06	99,1±4,5	77,8±5,7	120,5±3,3	50	43,2	100
Fe	2,8±0,1	2,63±0,07	3,0±0,1	2,5±0,1	3,5±0,07	2,2	1,3	3,8
Co	16,4±0,9	16,3±0,7	16,5±1,07	14,07±1,5	19±0,65	22	6,5	8
Br	30,5±3,3	39,4±1,9	26,1±4,1	44,6±7,7	7,7±0,50	26	1,2	5
Rb	77,1±3,5	79,6 ± 2,5	75,9±4	61,2±4,4	90,5±3,5	96	17,2	100
Sb	0,8±0,1	1±0,06	0,8±0,1	0,7±0,1	0,8±0,1	0,25	0,3	Н.д.
Cs	4,6±0,2	4,2 ± 0,1	4,9±0,2	4,2±0,3	5,5±0,1	5,9	1,2	6
Ba	431,6±23,6	382,8±17,5	456±26,6	350,7±28,8	561,3±24,5	36	124	500
Hf	5,8±0,2	5,4±0,1	6,0±0,2	4,3±0,3	7,5±0,2	2,5	3,8	6
Ta	1,1±0,06	1,2±0,04	1,08±0,3	1,1±0,1	1,05±0,06	1,9	0,16	Н.д.
Au	0,03±0,005	0,007±0,001	0,05±0,01	<п.о.	0,05±0,01	0,005	Н.д.	Н.д.
La	28,8±1,1	26,5±0,9	30±1,3	25,6±1,7	34,6±0,9	12	17,3	40
Ce	58,1±1,9	55,8±1,3	59,3±2,2	49±3,3	69,6±1,20	32	33,4	50
Sm	6,1±0,6	5,5±1,3	6,5±0,3	5,2±0,4	7,8±0,3	4,5	3,9	4,5
Eu	1,1±0,04	1,2±0,04	1,1±0,05	1,1±0,07	1,1±0,03	0,64	1,4	1
Tb	0,8±0,1	0,8±0,03	0,8±0,04	0,7±0,05	1,04±0,03	0,64	0,13	0,7
Yb	2,5±0,09	2,2±0,07	2,6±0,1	2,2±0,2	3,09±0,06	1,9	0,9	3
Lu	0,4±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,3±0,02	0,4±0,01	0,45	0,16	0,4
Sm/Lu	17,1	15,2	17,61	15,75	19,47	10	24,4	11,2
La/Yb	11,42	11,7	11,32	11,47	11,18	6,31	19,2	13,3
Ce/Eu	50,53	46,5	52,39	43,75	61,03	50	24	50
La+Ce/Yb+Lu	30,1	31,5	29,45	29,1	29,8	18,7	47,8	26

Приведены результаты нейтронно-активационного анализа; ± стандартная ошибка; <п.о. – ниже предела обнаружения; н.д. – нет данных. * – геохимический кларк ноосферы по Н.Ф. Глазовскому, 1982 г. [17], ** – Локальный фон «Заказник Томский», Е.Г. Язиков, 2006 г. [18], *** – Почвы мира, N.J.M. Bowen, 1966 г. [19].

Results of neutron-activation analysis; ± standard error; <n.o. below detection limit; н.д. not available. * geochemical clark of noosphere by N.F. Glazovsky, 1982 [17], ** local ground «Tomsk nature reserve» E.G. Yazikov, 2006 [18], *** the world soils, N.J.M. Bowen, 1966 [19].

ну с кларком мы видим превышение в 1,7 раза отношения в почвах элементов Sm/Lu и La/Yb, а отношение Ce/Eu практически равным. Выявленные различия указывают на специфику накопления данных элементов в почвах исследуемого района. Также видны отношения различных групп редкоземельных элементов. Так, значение отношений (La+Ce)/(Yb+Lu) превышает аналогичные значения в сравнении с кларком [17] и почвами мира [19], однако оно в 1,6 раза ниже фоновых значений.

Отношение Ce/Eu для почв Бакcharского района в целом составляет 50/53, что практически совпадает с кларковыми значениями и значениями в почвах мира [19], но превышает фоновое значение почти в 2 раза.

Значение отношения Sm/Lu в почвах Бакcharского района меньше фоновое в 1,5 раза и превышает эти значения для почв мира [19]. Ниже фоно-

вых и значений почв мира значение отношения La/Yb в почвах Бакcharского района.

Для почв сельских населенных пунктов Бакcharского района отношение Ce/Eu составляет от 43,9 (пос. Бакchar) до 55 единиц (пос. Высокий Яр), что выше фоновых значений в 2,3 раза, а Sm/Lu – 13 единиц в почвах пос. Бакchar (в 1,8 раз ниже фоновых значений). Значения отношения La/Yb в почвах населенных пунктов ниже фоновое значения «Заказник Томский».

Сравнительный анализ содержаний рассматриваемых элементов в почвах Бакcharского района с кларковыми значениями, фоновой территории (заказник «Томский»), средними содержаниями элементов в почвах мира показал, что содержание редких и редкоземельных элементов (Tb, Sm, Eu, Ce), а также Br и Ba в почвах Бакcharского района превышает их средние содержания в почвах мира (рис. 4).

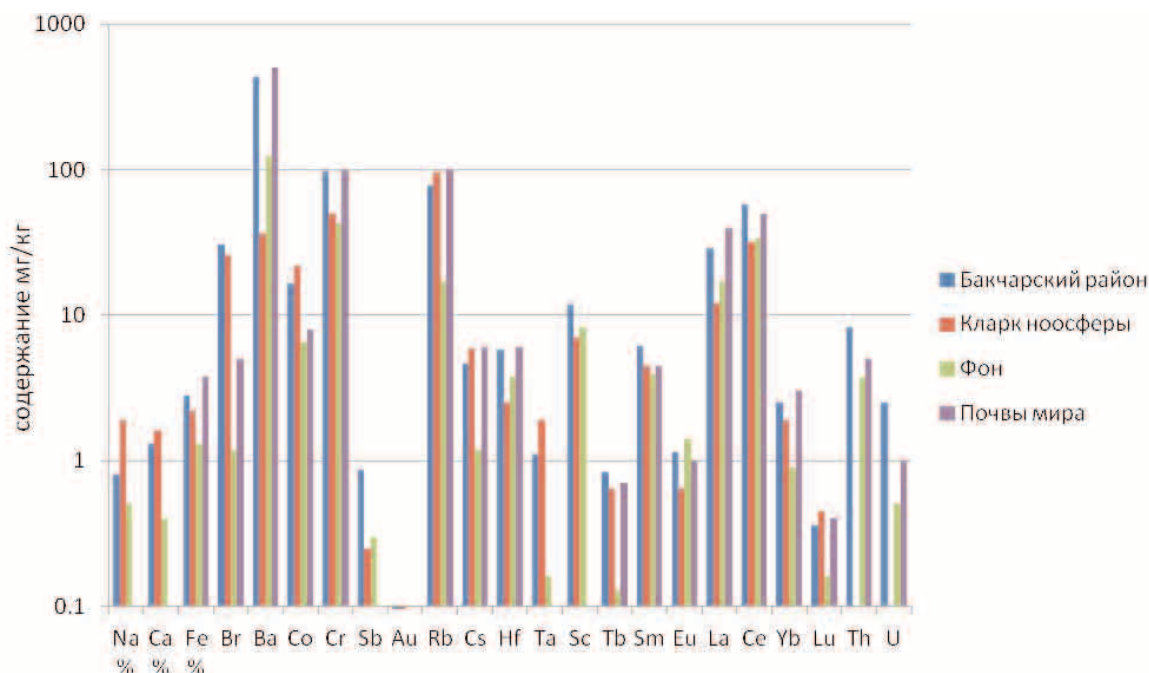


Рис. 4. Содержание элементов в различных почвах

Fig. 4. Content of elements in different soils

По результатам проведенных нами исследований почвы района характеризуются содержанием урана 0,9...5,4 при среднем значении 2,5 мг/кг, тория 4,6...11,2 при среднем значении 8,3 мг/кг, тогда как фоновые значения составляют 0,5 и 3,7 мг/кг соответственно (табл. 2).

Таблица 2. Содержание радиоактивных элементов и их отношение в почвах

Table 2. Content of radioactive elements and their ratio in soils

Территория Territory	U, мг/кг (mg/kg)	Th, мг/кг (mg/kg)	Th/U	Кол-во проб Amount of samples
	$m \pm \text{станд. ошибка}$ min/max $m \pm \text{stand. error}$ min/max	$m \pm \text{станд. ошибка}$ min/max $m \pm \text{stand. error}$ min/max		
Бакчарский район Bakchar region	$2,5 \pm 0,17$ 0,9/5,4	$8,3 \pm 0,3$ 4,6/11,2	3,2	83
Населенные пункты Settlements	$2,2 \pm 0,10$ 0,66/4,15	$7,7 \pm 0,18$ 4,55/10,76	3,4	39
Полынянский участок Polynynsky area	$2,4 \pm 0,31$ 0,26/7,64	$6,8 \pm 0,5$ 0,86/10,52	2,8	21
Западный участок Zapadny area	$3 \pm 0,12$ 1,8/4,5	$10,3 \pm 0,2$ 8,4/12,4	3,4	23
Томская область* Tomsk region *	2,5	9,9	4,0	–
Фон/Background	0,5	3,7	7,4	–
Почвы мира World soils	1	5	5	–

* по данным Л.П. Рихванова и др. (1997 г.) [20].

* by the data of L.P. Rikhvanov and others (1997) [20].

Видно, что показатель содержания U на Западном участке превышает все остальные сравниваемые показатели. Это, вероятно, можно объяснить

тем, что основными источниками поступления радиоактивных элементов в почвы этого района могут являться котельные предприятий и частного сектора, работающие на углях, и расположенные в этой части района. Угли как природные образования содержат в тех или иных количествах естественные и радиоактивные элементы [21]. Возможно, существует и природная причина несколько повышенных содержаний урана в пределах этой части изученного объекта (ураноносные торфяники, пески с цирконом и другие причины).

В целом среднее содержание урана в почвах Бакчарского района выше фоновых содержаний и почв мира и совпадает со средним показателем по Томской области.

Практически схожую картину мы наблюдаем с показателями среднего содержания в почвах Th. Содержание Th в почвах Западного участка превышает остальные сравниваемые показатели. Да и в целом среднее по району содержание Th превышает фон в 2,3 раза, но не больше среднего значения по Томской области.

В среднем почвы района характеризуются близким к нормальному Th/U значением от 2,8 (Полынянский участок) до 3,3 (Западный участок).

Донные отложения

В табл. 3 приведены средние содержания изученных элементов в донных отложениях рек территории Бакчарского района. Видно, что донные отложения рек района характеризуется повышенным содержанием Cr, Co, Br, Hf относительно их содержания в Байкальском иле (Индекс БИЛ-1, ГСО-7126–94, далее БИЛ-1).

Мы видим, что в донных отложениях происходит накопление практически всех изученных элементов, за исключением Ag.

Таблица 3. Среднее содержание элементов в донных отложениях рек Бакcharского района (мг/кг, кроме Na, Ca, Fe в мас. %)

Table 3. Average content of elements in bottom sediments in Bakchar region rivers (mg/kg, Na, Ca, Fe в wt. %)

Элемент Element	Бакcharский район Bakchar region	Байкальский ил (БИЛ-1) Baikal mud (BIL-1)
Na	0,7	1,5
Ca	1,51	1,3
Sc	13,3	13,5
Cr	125,5	66
Fe	3,7	4,9
Co	19,5	18
As	13,2	18
Br	15,4	13
Rb	97,8	93
Sb	0,6	0,9
Cs	5,4	5,8
Ba	445	715
Hf	7,4	3,9
Ta	1,1	0,8
Au	0,05	н.д.
La	28,9	45
Ce	62,9	80
Sm	6,1	7
Eu	1,2	1,4
Tb	0,9	0,9
Yb	2,5	2,9
Lu	0,4	0,4
Th	8,9	12,6
U	2,1	12
Sm/Lu	16,5	17,5
La/Yb	11,6	15,5
Ce/Eu	51,5	57,1
La+Ce/Yb+Lu	31,7	37,9

Примечание: н.д. – нет данных.

Note: n.a. – not available.

Отношение различных редкоземельных элементов в донных отложениях рек района не превышает их отношение в БИЛ-1.

Основной вклад в накопление элементов в донных отложениях вносят: Cr (Кк – 1,9), Hf (Кк – 1,89) (табл. 4).

Таблица 4. Геохимический ряд химических элементов в донных отложениях Бакcharского района (по Кк относительно БИЛ-1)

Table 4. Geochemical series of chemical elements in bottom sediments of Bakchar region (by Kk relative to BIL-1)

Территория Territory	Геохимический ряд/Geochemical series
Бакcharский район Bakchar region	Cr _{1,9} Hf _{1,89} Ta _{1,37} Br _{1,18} Ca _{1,16} Co _{1,08} Rb _{1,05} Tb ₁ Lu ₁ Sc _{0,98} Cs _{0,93} Sm _{0,87} Yb _{0,86} Eu _{0,85} Ce _{0,78} Fe _{0,75} As _{0,73} Th _{0,7} La _{0,64} Ba _{0,62} Sb _{0,6} Na _{0,46} U _{0,17}

Также нами были определены содержания Th и U в донных отложениях рек Бакcharского района.

В табл. 5 приведена сравнительная характеристика содержания тория и урана в донных отложениях рек района и БИЛ-1.

Таблица 5. Среднее содержание Th и U

Table 5. Average content of Th and U

Место отбора Sampling point	Элемент/Element		
	Th	U	Th/U
р. Бакchar/river Bakchar	7	0,7	10
р. Большая Галка/river Bolshaya Galka	11,4	3	3,8
р. Тетеренка river Teterenka	8,5	2,9	2,9
Профиль 2/Profile 2	6,1	2,5	2,4
Профиль 3/Profile 3	6,0	2,3	2,6
Среднее по району/Average in the region	7,8	2,3	3,4
оз. Байкал/Baikal lake	12,6	12	1,05

Значение торий-уранового отношения в донных отложениях рек Бакcharского района в 3,3 раза превышает это значение относительно БИЛ-1.

Специфика донных отложений рек Бакcharского района определяется низким показателем относительно концентрации естественных радиоактивных элементов в БИЛ-1, что объясняется природными факторами.

Снеговой покров

По величине суммарного показателя загрязнения территория Бакcharского района характеризуется следующим образом: Полынянский участок – 58,2, Западный участок – 84,23 и населенные пункты – 96,87, что, в соответствии с градацией [22] (суммарный показатель загрязнения от 64 до 128), говорит о низкой и средней степени загрязнения.

Самая низкая степень загрязнения приходится на Полынянский участок, в пределах которого отсутствуют населенные пункты, средний уровень приходится на населенные пункты и Западный участок, где имеются местные котельные, использующие уголь.

Что же касается величины пылевой нагрузки, то она является низкой, в сравнении со средней пылевой нагрузкой по России. Относительно повышенное высокое значение пылевой нагрузки на западном участке обусловлено наличием значительного количества населенных пунктов, находящихся в его пределах (рис. 5).

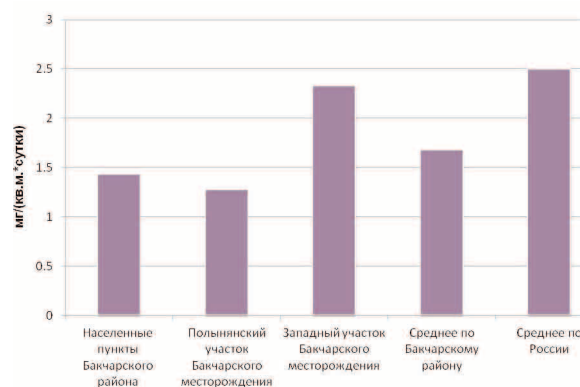


Рис. 5. Распределение пылевой нагрузки

Fig. 5. Dust load distribution

Проведенная оценка пылевого загрязнения территории Бакcharского района по эколого-геохимическим показателям твердого осадка позволяет прогнозировать ниже средние показатели суммарной заболеваемости хроническими заболеваниями, а также функционально-морфологические отклонения, согласно методическим рекомендациям Минздрава СССР (№ 4426–87).

Таблица 6. Среднее содержание элементов в твердом осадке снегового покрова (мг/кг, кроме Na, Ca, Fe в мас. %)

Table 6. Average content of elements in snowfall of snow cover (mg/kg, Na, Ca, Fe in wt. %)

Элементы Elements	Места отбора/Sampling point				Фон* Background
	В пределах населенных пунктов района (36 проб) Within the settlements of the region (36 samples)	Полынянский участок (20 проб) Polynyansky area (20 samples)	Западный участок (22 пробы) Zapadny area (22 samples)	В целом по Бакcharскому району (78 проб) In Bakchar region (78 samples)	
Na	0,5±0,02	0,4±0,03	0,6±0,03	0,5±0,03	0,2
Ca	0,8±0,06	0,6±0,04	1±0,05	0,7±0,05	0,8
Sc	8±0,4	6,1±0,4	9±0,4	7,6±0,4	7,1
Cr	140,9±10,4	107±10,1	156±10,1	134,6±10,2	110
Fe	3,2±0,2	3±0,4	3,1±0,1	3,1±0,2	1,9
Co	13,1±0,8	10,9±1,3	11,2±0,5	11,7±0,9	10,3
As	6,6±1,8	0,8±0,58	<п.о.	3,7±1,2	0,5
Br	8,1±0,6	7,5±0,8	8,7±0,6	8,1±0,7	2,9
Rb	52,9±2,7	42,6±4,1	59,8±3,5	51,7±3,4	55
Sb	6,8±0,5	7,5±0,98	6,9±0,7	7,05±0,7	2,3
Cs	3,6±0,2	3,03±0,2	4,3±0,2	3,6±0,2	3,5
Ba	790,3±64,5	511±62,6	810,2±55,1	703,7±60,7	100
Hf	3,8±0,1	2,9±0,2	4,09±0,2	3,6±0,2	2,2
Ta	0,7±0,1	0,4±0,06	0,6±0,04	0,6±0,06	0,1
Au	0,09±0,01	0,06±0,005	0,4±0,08	0,2±0,03	0,2
La	32,7±2,6	21,6±1,2	31,8±1,8	28,7±1,9	2,8
Ce	68,7±6,4	48,5±3,4	60,5±2,8	59,2±4,2	10,3
Sm	4,6±0,2	2,9±0,2	4,6±0,3	4,03±0,2	0,6
Eu	1,01±0,06	0,7±0,05	0,1±0,05	0,9±0,05	1,1
Tb	0,6±0,04	0,5±0,03	0,6±0,03	0,6±0,03	0,06
Yb	2,1±0,1	1,4±0,09	2,2±0,1	1,9±0,1	0,2
Lu	0,3±0,01	0,2±0,01	0,3±0,02	0,3±0,01	0,07
Th	6,8±0,6	6,3±0,9	6,6±0,3	6,5±0,6	2,9
U	2,6±0,1	2,1±0,2	3,1±0,6	2,6±0,3	0,2
Th/U	2,6	3	2,1	2,6	14,5
Sm/Lu	15,8	14,5	15,8	15,3	8,6
La/Yb	15,5	15,4	14,7	15,2	14
Ce/Eu	68	69,2	63	66,7	9,4
La+Ce/Yb+Lu	42,4	43,75	37,6	41,2	37,4

Примечание: данные ИНАА; ± – стандартная ошибка; * – по данным А.Ю. Шатилова (2001 г.) с дополнениями Е.Г. Язикова (2006 г.) [18].

Note: data of ENAA; ± standard error; * by the data of A. Yu. Shatilov (2001) with supplements of E. G. Yazikov (2006) [18].

Содержание химических элементов в твердом остатке снегового покрова приведено в табл. 6.

По значению коэффициента вариации (V %) большинство химических элементов характеризуются:

населенные пункты района (равномерным распределением, кроме Au, As, Ag V % >50), Полынянский участок (равномерным распределением, кроме Fe, Co, As, Ag, Sb, Ba, Th, V % >50), Западный участок (равномерным распределением, кроме Au V % >50).

Сравнение средних содержаний химических элементов в пробах, отобранных в населенных пунктах и Полынянском участке, со средними содержаниями химических элементов в пробах, отобранных на Западном участке, показало различия средних содержаний редких, редкоземельных элементов, Ba, Cr, Au. Это можно объяснить тем, что на Западном участке преимущественно сосредоточены населенные пункты, в которых местные котельные используют уголь.

В пробах твердого осадка снега Бакcharского района рассматриваемые элементы варьируют по величине коэффициента концентрации. Химические элементы, содержащиеся в твердом осадке на уровне фоновых или более низких концентраций, являются природными и имеют общие региональные источники.

Анализ геохимического ряда элементов (табл. 7), показывает, что спецификой пылеаэрозолей Бакcharского района является их обогащение такими элементами, как As, U, Tb, La, Ba, относительно условного фона (Kк>5).

Таблица 7. Геохимические ряды ассоциаций элементов (относительно фона) в пробах твердого осадка снега Бакcharского района

Table 7. Geochemical series of elements associations (relative to the background) in samples of snowfall in Bakchar region

Район/Region	Геохимический ряд/Geochemical series
Населенные пункты Settlements	As_{13,7} U₁₃ La_{11,7} Yb_{10,7} Tb₁₀ Sm_{8,2} Ba₈ Ta_{7,1} Ce_{6,7} Lu_{3,9} Na_{3,7} Sb₃ Br_{2,8} Th_{2,4} Hf_{1,8} Fe_{1,7} Ag_{1,36} Cr_{1,3} Co_{1,3} Sc_{1,12} Cs_{1,04} Ca_{1,01} Rb₁ Eu_{0,9} Sr_{0,75} Au_{0,4}
Полынянский участок Polynyansky area	U_{10,65} Tb_{8,65} La_{7,72} Yb_{7,15} Ba_{5,11} Sm_{5,09} Ce_{4,72} Ta_{4,41} Ag_{4,38} Sb_{3,24} Na_{2,93} Lu_{2,75} Br_{2,62} Th_{2,19} As_{1,66} Fe_{1,63} Hf_{1,35} Co_{1,06} Cr_{0,97} Sc_{0,87} Cs_{0,87} Rb_{0,77} Ca_{0,74} Eu_{0,66} Au_{0,28}
Западный участок* Zapadny area	U_{15,47} La_{11,3} Yb_{10,74} Tb_{10,39} Sm_{8,08} Ba_{7,98} Ta_{6,62} Ce_{5,91} Na_{4,18} Lu_{3,84} Br_{2,96} Sb_{2,87} Th_{2,27} Hf_{1,86} Au_{1,81} Fe_{1,7} Cr_{1,44} Sc_{1,28} Cs_{1,26} Ca_{1,22} Co_{1,10} Rb_{1,09} Eu_{0,86}
Бакcharский район Bakchar region	U_{13,3} La_{10,26} Tb_{9,6} Yb_{9,6} As_{7,8} Sm_{7,12} Ba_{7,05} Ta_{6,04} Ce_{5,78} Na_{3,6} Lu_{3,5} Sb_{3,05} Ag_{2,87} Br_{2,79} Th_{2,3} Fe_{1,7} Hf_{1,67} Cr_{1,24} Co_{1,15} Sc_{1,12} Cs_{1,06} Ca_{0,99} Rb_{0,95} Au_{0,83} Eu_{0,8} Sr_{0,75}

* – во всех пробах снежного покрова территории западного участка As ниже предела обнаружения.

* As is below detection limit in all samples of snow cover in Zapadny area.

На территории Бакcharского района концентрация урана в твердом осадке снега изменяется от 1,7 до 4 мг/кг при среднем значении 2,6 мг/кг, тогда как содержание тория колеблется от 3,8 до 14,3 мг/кг при средней величине 6,56 мг/кг (табл. 8).

Таблица 8. Средние содержание U и Th в твердом осадке проб снегового покрова**Table 8.** Average contents of U and Th in the solid sediment samples of snow cover

Территория Territory	U, мг/кг (mg/kg)	Th, мг/кг (mg/kg)	Th/U
Фон* Background*	0,2	2,9	14,5
Бакcharский район Bakchar region	2,6±0,3	6,56±0,6	2,57
Населенные пункты Settlements	2,6±0,1	6,8±0,6	2,6
Полынянский участок Polynyansky area	2,1±0,2	6,3±0,9	3
Западный участок Zapadny area	3,1±0,6	6,59±0,31	2,12
Условно фоновый район Conventionally reference area			
«Заказник Томский» «Tomsk nature reserve»	2,1±0,2	4,8±0,1	2

* по данным А.Ю. Шатилова (2001 г.) [23].

* by the data of A.Yu. Shatilov (2001) [23].

Повышенные концентрации U (15,5 фонов) и Th (2,2 фона) приходится на Западный участок, где располагаются населенные пункты, в которых частный сектор и местные котельные используют уголь в качестве топлива. Поступление радиоактивных элементов в атмосферу связано преимущественно со сжиганием угля, что подтверждается [24]. При сравнении содержаний Th и U в пробах условно фонового участка за пределами месторождения, с содержанием этих же элементов в целом по району, мы видим превышение по U в 1,2 раза, а по Th в 1,3 раза.

Можно также предполагать, что это может быть связано с пылевым разносом осадочного материала осадочных толщ, в котором могут находиться пески, содержащие циркон, монацит, ильменит и др. (Туганский тип проявления).

Поверхностные и подземные воды

а) Поверхностные воды исследовались в ряде точек (рис. 2) рек: Большая Галка, Бакchar, Тетеренка (западный участок) и Полынянский участок. Питание водотоков происходит весной, летом и осенью за счет таяния снега, выпадения атмосферных осадков, почвенно-грунтового питания. Воды рек слабо минерализованы и содержат небольшое количество взвесей, но богаты содержанием органических соединений, вносимых из окрестных торфяников (табл. 9) [25].

Исследование вод показало, что по показателю рН состав вод изменяется от 6,6 до 7,5, общая минерализация колеблется от 250 до 567 мг/л. Из таблицы видно, что в пробах вод рек западного участка содержание Cl⁻ в значительной мере превышает аналогичные показатели в пробах водотоков Полынянского участка, в связи с отсутствием населенных пунктов в последнем, что может подтверждать положение о том, что хлор-ион является наиболее характерным показателем антропогенного загрязнения. Об этом говорилось в [25].

Содержание Mg²⁺ (река Бакchar 23,2 мг/л) в 1,9 раз больше аналогично значения в пробе профиля 2–0 (12,2 мг/л). Сумма ионов Na⁺+K⁺ (река Бакchar 31,1 мг/л) больше в 2,7 раз суммы профиля 2 (11,6 мг/л). Среднее значение рН в исследованных речных водах составляет 6,94.

Таблица 9. Макрокомпонентный состав поверхностных вод рек Бакcharского района**Table 9.** Macro-fractional composition analysis of surface waters of Bakchar region rivers

Место отбора Sampling point	р. Бакchar Bakchar river	р. Большая Галка river Bolshaya Galka	р. Тетеренка river Teterenka	профиль 2 profile 2	1 км от профиля 3–0 1 km from profile 3–0
рН (ПДК 6,5–9)	7,5	7,4	7,3	6,6	6,8
CO ₂	10,5	10,4	10,3	31,6	26,4
CO ₃ (мг/л) CO ₃ (mg/l)	0	0	0	0	0
HCO ₃ ⁻	415	410	402	183	195
SO ₄ ²⁻ (ПДК 500)	0	0	0	0	0
Cl ⁻ (ПДК 350)	15,6	15,1	14,8	2,8	4,6
ОЖ, мг-экв/л (ПДК 7) Total stiffness, mg-eq/l (MPC 7)	6	6	5	3	3,2
Ca ²⁺	82	80	79	40	40
Mg ²⁺	23,2	22,1	22,6	12,2	14,6
Na ⁺ мг/л (mg/l)	30	26	24	10	14
K ⁺	1,1	1,2	1,1	1,6	1,8
Мин., мг/л Mineralization, mg/l	567	515	496	250	270
Fe	0,5	0,4	0,4	0,4	7,8

ОЖ – общая жесткость, мг-экв/л; Мин – минерализация.

Концентрация Fe_{общ} в водах рек колеблется в диапазоне от 0,4 до 7,8 мг/л. Последняя величина является наибольшим единичным пиком (профиль 3–0) содержания Fe_{общ} в речных водах, что превышает кларк в речной воде и приблизительно соответствует верхнему пределу диапазона содержания этого элемента в водах болот исследуемого района.

Проводя сравнительную характеристику содержания элементов в поверхностных водах с их содержанием в ранее проведенных работах [26, 27] выявлены следующие закономерности (табл. 10).

Из таблиц видно, что в поверхностных водах изменилось содержание в сторону увеличения таких компонентов, как Ni (в 2 раза), Co (в 4 раза) и Cr (в 4,1 раза).

Микрокомпоненты могут поступать как из атмосферных осадков, так и из подстилающих пород.

б) Пробы подземных вод отбирались непосредственно из скважин, пробуренных на территории Западного и Полынянского участков, а также из скважины, находящейся за пределами исследуемого района.

Таблица 10. Содержание элементов в поверхностных водах

Table 10. Content of elements in surface waters

Название/Title	Cu	Zn	Ag	Ni	Co	Ti	Cr	Zr	V	Mn	Fe
р. Бакchar (1968 г.) [25, 26]/Bakchar river (1968) [25, 26]	2,84	10,96	0,09	0,95	0,65	1,1	0,9	9,5	0,95	26	2,72*
Среднее по рекам (2008 г.)/Average for the rivers (2008)	0,85	6,6	0,004	1,9	2,6	0,6	3,7	0,2	0,4	4,7	1,9

*по данным [27].

*by the data [27].

Скважина 1 – первая скважина, пробуренная на Полынянском участке.

Скважина 2 – в 13 км от с. Подольск.

Скважина 3 – недалеко от с. Поротниково, глубина отбора 6 м.

Скважина 4 – в 300 м от разведочной скважины с. Полынянка.

По ионному составу воды гидрокарбонат-хлоридные ($\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{Cl}^-$), высоко минерализованы (табл. 11).

Таблица 11. Макрокомпонентный состав подземных вод

Table 11. Macro-fractional composition of surface waters

Место отбора (скважина) Sampling area (well)	1	2	3	4
pH (ПДК 6,5–9)	6,74	6,89	9,35	6,74
CO ₂	66	60,7	60	18,4
CO ₃ (мг/л)/mg/l	0			
HCO ₃ ⁻	427	620	695	160
SO ₄ ²⁻ (ПДК 500)	10	0	200	20
Cl ⁻ (ПДК 350)	53,3	29	32,7	7
NH ₄ ⁺	–			
ОЖ, мг-экв/л (ПДК 7) Total stiffness, mg-eq/l (MPC 7)	7	8	0,5	2,9
Ca ²⁺	60	10	4	40
Mg ²⁺	48,8	35,4	3,66	11
Na ⁺ , мг/л/mg/l	142	89	350	39
K ⁺	7,7	2,7	4,7	4,7
Мин., мг/л Mineralization, mg/l	749	880	1290	282
Fe	0,7	11,4	28,6	3,7

ОЖ – общая жесткость, мг-экв/л; Мин – минерализация.

Важным моментом является отсутствие аммония (NH₄⁺), что говорит об отсутствии загрязненности подземных вод органическими веществами хозяйственно-бытовых и промышленных стоков.

Можно отметить относительно высокие концентрации (первый десятки мг/л) SO₄²⁻ (скважина 3). Видно, что показатель Mg²⁺ в пробах скважина 1 и

2 (35,4 и 48,8 мг/л соответственно) значительно превышает эти показатели в пробах скважина 3 и 4. Наибольшая сумма ионов Na⁺+K⁺ – в пробе скважины 3, а показателя Cl⁻ – в пробе скважины 1.

Из приведенных данных мы видим, что по уровню pH и показателю CO₂ в пробе скважины 3 самые высокие значения (9,35 и 60), а по показателю SO₄²⁻ самые низкие (0) в скважине 2 наряду с другими.

Воды характеризуются высоким содержанием Fe, которое изменяется от 0,74 до 28,6 мг/л.

В табл. 12 приведено содержание ряда элементов в подземных водах.

Из табл. 12 видно, что содержание таких элементов, как As, Th, U в пробах скважины № 3 превышает их содержание в других пробах.

Общая минерализация вод увеличивается (от 282 до 1290 мг/л) за счет Mg (от 3,66 до 48,8), HCO₃ (от 160 до 695). Уменьшается содержание CO₂ (от 66 до 18,4)

Таким образом, в условиях минерального питания при значительном увлажнении начали образовываться в частях территории низинные болота даже при отсутствии грунтового питания. О возможности подобного образования говорил А.Я Бронзов [28].

Радиационная характеристика в районе месторождения

При выполнении работ одновременно с геохимическим опробованием производились замеры радиоактивности поверхностного слоя почвы на всем протяжении геологических маршрутов с равномерным охватом всей площади района.

По результатам измерений мощность экспозиционной дозы почв на поверхности изменяется в пределах от 5 до 14 мкР/ч. Наиболее низкие значения радиоактивности отмечаются на Полынянском участке. Почвы, сформировавшиеся на современных отложениях, характеризуются значениями

Таблица 12. Содержание элементов в подземных водах

Table 12. Content of elements in underground waters

Скважина Well	Cu	Zn	Ag	Ni	Sr	zTi	As	Th	U	Fe
Элемент Element										
1	0,009	0,031	0,00002	0,01	0,45	0,00001	0,03	0,0008	0,0006	11,4
2	0,0005	0,001	3,3·10 ⁻⁷	0,0005	1,17	0	0,02	5,6·10 ⁻⁶	2,8·10 ⁻⁶	0,74
3	0,05	0,44	0,0002	0,02	0,08	0,00006	0,06	0,002	0,0012	28,6
4	0,0004	0,006	0,000003	0,002	0,48	1·10 ⁻⁶	0,0006	2,9·10 ⁻⁶	0,00002	3,7

ми интенсивности радиоактивности в пределах 5...10 мкР/час, причем наиболее низкие значения отмечаются на 1 и 2 профилях Польшинского участка и в населенном пункте Кенга. Повышенные значения радиоактивности отмечены в районе разведочной скважины № 3 около с. Поротниково (14 мкР/ч), однако природа данного значения нами не выявлена. В целом на Бакcharском месторождении высоких значений радиоактивности почв не отмечается.

Элементный состав солевых образований из питьевых вод Бакcharского района

Пробы солевых отложений (накипи) отбирались практически во всех поселках района, так же, как и пробы волос детей [29–31]. Сравнивая данные элементного состава накипи, можно сказать, что содержания почти по всем элементам в районе ниже, чем по области, за исключением более высокого содержания Na, Sb, Sr, As. Ва на том же уровне, что и по Томской области. Всю специфику элементного состава накипи можно проследить по диаграммам (рис. 6).

Сравнительный анализ накопления элементов по поселкам показывает, что больше всего накапливается таких элементов, как Na, Ca, Sc, Fe, Co, Zn, Br, Rb, Sb, La, Ce, Sm, Th, U, Hf, Au, Ba, Sr, Cs, Ta и As.

Лидирующими поселками являются Кенга (с радиоактивными элементами), Богатыревка и Подольск (с тяжелыми металлами), Большая Галка (с большим разнообразием элементов, превышающих областные показатели), Бакchar, Польшинка и Бородинск, в которых присутствуют как тяжелые металлы, так и радиоактивные элементы, в том числе и U.

Сопоставляя уровни накопления изученных микроэлементов в накипи питьевой воды населенных пунктов Бакcharского района со средним содержанием в этой среде по Томской области, можно отметить, что элементами, коэффициенты концентраций которых больше 1, являются: As, Na, Au, Fe, La, Ce, Hf, Br, Rb, Th, Sb, Cs, Ba, Ca, Ta, Th, Co, Zn, Sr, Sc и U [29]. Уран характерен для накипи из таких поселков, как Бакchar, Польшинка и Бородинск (самый высокий коэффициент концентрации – 8,2).

Наибольшее количество микроэлементов, имеющих коэффициент концентрации более 1, в п. Кенга (10 элементов), п. Большая Галка (9 элементов), п. Бородинск (7 элементов), тогда как их меньшее количество (1 элемент) зафиксировано в п. Кедровка, п. Паньчево, п. Чернышевка, а в п. Вавилонка вообще отсутствуют такие элементы.

Таким образом, проведенная работа по микроэлементной характеристике солевых образований из посуды свидетельствует о чрезвычайно сильном различии в составе питьевых вод, используемых населением. Содержание в питьевых водах редких, редкоземельных и радиоактивных микроэлементов оказывает определенное влияние и на состояние здоровья населения [30].

Элементный состав волос детей Бакcharского района

Для выявления влияния природной геохимической ситуации на формирование элементного состава волос населения были рассмотрены особенности накопления элементов в составе изученного биосубстрата Бакcharского района, в недрах которого локализуются крупные ресурсы железных руд (Бакcharский железорудный узел) (рис. 7).

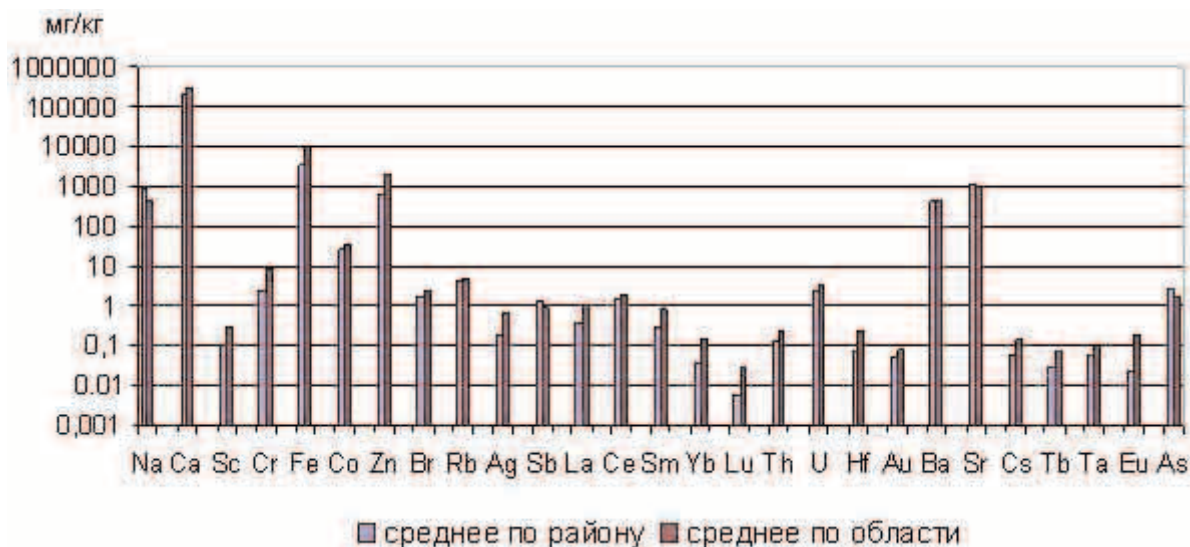


Рис. 6. Коэффициенты концентрации элементов в солевых отложениях питьевых вод Бакcharского района Томской области относительно их среднерегионального показателя по данным [28]. Шкала прологарифмирована

Fig. 6. The coefficients of the concentration of elements in the salt deposits of drinking water Bakchar district of Tomsk region relative to their average republican parameter According to [28]. The scale is logarithms

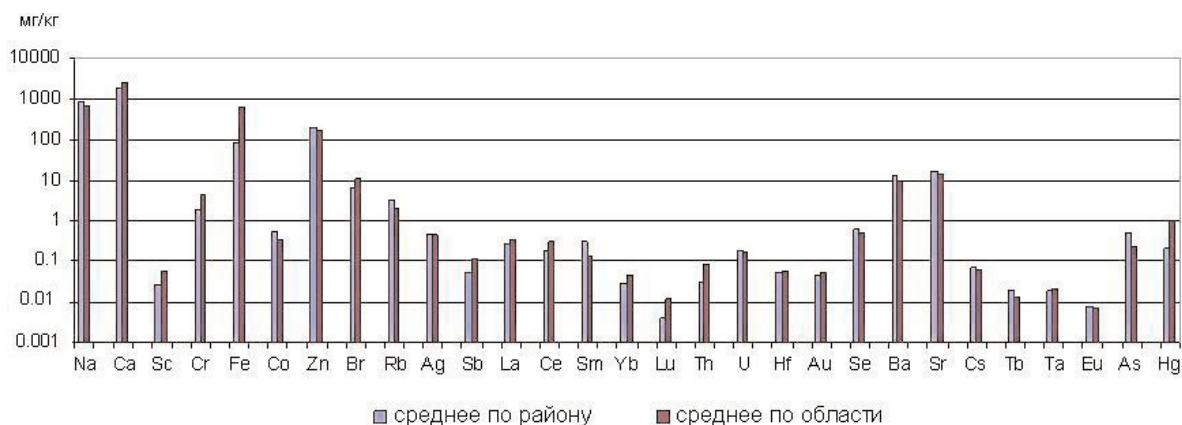


Рис. 7. Коэффициенты концентрации элементов относительно среднеобластного показателя в волосах детей, проживающих в Бакчарском районе [30]. Шкала прологарифмирована

Fig. 7. Coefficients of element concentration relative to mid-region value in hair of children in Bakchar region [30]. The scale is logarithms

Анализ полученных материалов показывает, что на территории Бакчарского района наблюдается неравномерное распределение Na, Ca и Fe.

Сравнительный анализ накопления элементов по поселкам показывает, что накапливаются Na, Sc, Cr, Co, Br, Rb, Ag, La, Sm, Lu, Hf, Se, Cs и др. в населенных пунктах Парбиг, Панычево, Подольск, Бородинск. Та, Tb, Eu, As находятся во всех пробах ниже предела обнаружения

Бакчарский район имеет свои особенности, на его территории локализуются крупные ресурсы железных руд (Бакчарский и Колпашевский железорудные узлы).

Содержание железа в составе волос детского населения Бакчарского района составляет в среднем 99 мг/кг, что в 2 раза ниже среднеобластных показателей. Данный факт, возможно, обусловлен формой нахождения железа в питьевых водах [31].



Рис. 8. Участки геоэкологического мониторинга в различных зонах

Fig. 8. Regions of geo-ecological monitoring in different zones

Природные аномалии, по всей видимости, идентифицируются по неоднородному характеру распределения элементов в рамках локальных территорий с повышением их концентрации в волосах детей. От техногенных они отличаются меньшими показателями коэффициентов концентрации, средними уровнями накопления и наличием специфических ассоциаций химических элементов, как правило, характерных для геологических, геохимических аномалий.

Таким образом, проведенная работа по микроэлементной характеристике волос детей свидетельствует о чрезвычайно сильном различии в составе волос детей, проживающих в Бакcharском районе. Содержание в волосах редких, редкоземельных и радиоактивных микроэлементов оказывает определенное влияние на состояние здоровья населения [31].

Этот фактор воздействия на здоровье человека следует учитывать, как при анализе заболеваемости населения, так и для лечения и профилактики.

Мониторинг окружающей среды

При разработке Бакcharского железорудного месторождения и других связанных с ним объектов хозяйственной деятельности перед нами будет представлена сложная природно-техногенная система, содержащая, как правило, ряд источников антропогенного воздействия на окружающую (в т. ч. геологическую) среду. С целью выявления изменений, которые будут происходить в окружающей природной среде при разработке месторождения, необходимо наметить опорные участки геоэкологического мониторинга для всех природных сред, расположенных в разных зонах (рис. 8) [32].

Зона I

В нашем случае это будет участок первоочередной отработки месторождения, расположенный к юго-западу от пос. Бакchar. Его координаты: 56°59'25"/с.ш. 82°01'45"/в.д., 56°59'25"/с.ш. 82°04'10"/в.д., 56°58'00"/с.ш. 82°01'45"/в.д., 56°58'00"/с.ш. 82°04'10"/в.д. – непосредственно в зоне ведения работ и расположения технологических объектов (определяется природными геологическими и технико-экономическими факторами), которые будут влиять на изменение состояния недр и компонентов окружающей природной среды в пределах границ горного отвода.

Зона II

Границы участка с востока на запад – от пос. Полянская до пос. Чернышевка, с севера на юг – от пос. Чумакаевка до поисково-разведочной скважины 116. В границы участка попадают лицензионные участки Западный и Восточный (полянский). Его координаты: 56°59'25"/с.ш. 82°01'45"/в.д., 56°52'05"/с.ш. 82°15'00"/в.д., 56°58'40"/с.ш. 82°01'45"/в.д., 57°02'35"/с.ш. 82°05'30"/в.д., 57°02'10"/с.ш. 82°10'40"/в.д. – в зоне существенного

Таблица 13. Геохимические показатели природных сред в рекомендуемой фоновой площадке (Зона III) для района предполагаемой отработки месторождения по состоянию на 2009 г. (мг/кг; кроме Na, Ca, Fe в мас. %)

Table 13. Geochemical indices of natural environment in suggested background area (Zone III) for the region of well supposed treatment as at 2009 (mg/kg; except Na, Ca, Fe in wt. %)

Элемент Element	Природные среды/Natural environments					Солевые отложения (накись) Salt sediments (scale)	Волосы детей Hair of children
	Почва Soil	Снеговой покров Snow cover	Донные отложения Bottom sediments	Поверхностные воды Surface waters	Подземны, воды* Underground waters		
Na	0,89	0,58	0,94	18,8	Н.о.	893	822
Ca	1,9	0,67	1,7	Н.о.		214561	1850
Sc	13,3	10,1	14,9			0,1	0,026
Cr	111,2	147,5	158,3			2,38	1,85
Fe	3,0	3,7	4,2	0,5	28,6	3205	88
Co	16,4	13,8	19,9	0,0007	0,008	27	1,54
Zn	–			Н.о.		649	194
As	<п.о.	15,2	<п.о.	0,0018	0,06	2,8	<п.о.
Br	47,5	7,5	8,9	0,06	0,12	1,72	24
Rb	75	72	113	0,0021	0,02	4,3	17
Ag	<п.о.			0,000003	0,0001	0,2	1,03
Sb	1,4	7,2	1,11	0,00006	0,001	1,36	0,19
Cs	4,9	4,5	6,2	0.00000348	0,0009	0,06	0,36
Ba	453	630	798	0,02	0,229	395	42
Sr	<п.о.	75	<п.о.	0,42	0,08	1079	26
Hf	6,0	4	11,8	0,000002	0,0012	0,08	0,16
Ta	1,51	1	1,2	0.0000004	0,0001	0,06	<п.о.
Au	<п.о.	0,077	0,03	Н.о.		0,05	0,09
La	32,2	53,7	27,8	0,0000068	0,008	0,37	0,7
Ce	63,1	131,2	69,4	0,00000123	0,02	1,5	0,2
Sm	5,4	4,6	5,1	0.00000237	0,001	0,31	0,98
Eu	1,73	1,2	1,36	<п.о.		0,023	<п.о.
Tb	0,87	0,71	1,21	0.000000831	0,0003	0,03	
Yb	2,8	2,5	2,9	0.0000014	0,0006	0,04	0,11
Lu	0,48	0,33	0,4	0.000000616	0,00009	0,006	0,02
Th	9,0	7,3	11,4	0,0000047	0,002	0,12	0,04
U	3,2	2,8	3	0,0004	0,001	2,36	0,77

* за фоновые содержания приняты результаты анализа пробы подземной воды скважины № 3 (скважина недалеко от с. Поротниково, глубина отбора 6 м). Уровень пылевой нагрузки составляет $P_n=1,4 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$; $MЭД=10 \text{ мкг}/\text{ч}$.

* The results of analysis of underground water sample from the well 3 are taken as the background contents (the well is not far from settlement Porotnikovo, sampling depth is 6 m). The level of dust load is $P_n=1,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$; $MЭД=10 \text{ μг}/\text{h}$.

влияния разработки месторождения на различные компоненты геологической среды, которая устанавливается по распространению участков (площадей) активизации опасных геологических процессов под влиянием добычи полезного ископаемого. Они определяются гидрогеологическими условиями и особенностями системы отбора подземных вод, а также наличием или отсутствием системы обратной закачки дренажных вод.

Зона III

Ее границы и площадь необходимо принять таким образом, чтобы в процессе мониторинга можно было проследить фоновые изменения состояния геологической среды, сравнить их с ее изменениями в зоне II и выделить те из них, которые связаны с разработкой месторождения, и те, которые определяются другими факторами. Участок предполагается расположить в районе пос. Большая Галка, который находится за пределами лицензионных участков в противоположном направлении по «розе ветров» (табл. 13).

В связи с тем, что зона существенного влияния разработки Бакcharского месторождения будет со временем расширяться, ее размер необходимо уточнять по результатам ведения мониторинга.

Подведение итогов

В районе Бакcharского месторождения впервые был проведен комплексный эколого-геохимический анализ природных сред.

В результате проведенных геохимических исследований были установлены основные оценочные геохимические параметры природных сред (почва, пылеаэрозоли, донные отложения, поверхностные и подземные воды, биосубстрат) и определен естественный радиационный фон. Полученная геохимическая характеристика природных сред позволит оценить изменение состояния окружающей среды в районе предполагаемой отработки месторождения и использовать эти данные для организации мониторинга.

Авторы выражают благодарность за помощь всем участникам работ. Работы выполнялись в соответствии с договором между Томским политехническим университетом и Томской горнодобывающей компанией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и полезные ископаемые России / под ред. А.Э. Контровича, В.С. Суркова. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. – Т. 2. – С. 129–133.
2. Бабин А.А. Бакcharское железорудное месторождение (геология, закономерности размещения и генезис железных руд): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1969. – 248 с.
3. Западно-Сибирский железорудный бассейн / под ред. Ф.Н. Шахова. – Новосибирск: СО РАН СССР, 1964. – 448 с.
4. Николаева И.В. Бакcharское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: АН СССР, 1967. – 129 с.
5. Отчет по Госконтракту № ТВ-04-04-2006 «Оценка Бакcharского железорудного месторождения для отработки методом СГД». – Томск: ООО «НПО ТомГДК РУДА», 2009. – Т. 1. – 152 с.
6. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер, Е.И. Ильницкая и др. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
7. Тепляков И.М., Домаренко В.А., Молчанов В.И. Геотехнологические методы разработки железорудных месторождений Западно-Сибирского бассейна // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. – Красноярск: КНИИГИМС, 2001. – Вып. 2. – С. 169–175.
8. Копысов С.Г. Параметры экологически допустимой разработки Бакcharского железорудного месторождения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2011. – № 5. – С. 420–425.
9. Уфимцев К.А. Почвы южной части таежной зоны Западно-Сибирской равнины. – М.: Колос, 1974. – 202 с.
10. Геолого-гидрологическое строение и полезные ископаемые листа 0-44-29 // Окончательный отчет Бакcharской геолого-съемочной партии по работам за 1962–1964 гг. – Томск, 1964. – Т. 1.
11. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. – М.: Стандартинформ, 1984. – 7 с.
12. ГОСТ 17.1.5.05–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. – М.: Стандартинформ, 1985 – 12 с.
13. ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.
14. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 1986. – 7 с.
15. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. – М.: Росгидромет, 1991. – 1360 с.
16. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / под ред. Ю.Е. Саета, Б.А. Ревича. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
17. Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки веществ в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982. – С. 7–28.
18. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 47 с.
19. Bowen N.J.M. Trace elements in biochemistry. – London; New York: Academic Press, 1966. – 248 p.
20. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, Н.В. Барановская, А.В. Волостнов и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 128–136.
21. Радиоактивные элементы в углях / Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С. 104–109.
22. Геохимия окружающей среды / под ред. Ю.Е. Саета, Б.А. Ревича, Е.П. Янина и др. – М.: Недра, 1990. – 336 с.
23. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис...канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 22 с.
24. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Д-Принт, 2007. – 468 с.
25. Савичев О.Г., Базанов В.А., Здвижков М.А. Химический состав природных вод болотных ландшафтов с разной степенью антропогенной нагрузки // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири: Матер. научной конф. – Томск, 2003. – С. 274–276.

26. Отчет по научно-исследовательской теме: Разработка методики гидрогеологических и гидрогеохимических исследований на различных стадиях разведки торфяных месторождений Западной Сибири / Н.М. Рассказов и др. – Томск, 1968. – 116 с.
27. Здвижков М.А. Гидрогеохимия Васюганского болотного массива: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 175 с.
28. Бронзов А.Я. Верховые болота Нарымского края (бассейн р. Васюган) // Труды научно-исследовательского торфяного института. – М.: 1930. – Вып. 3. – С. 1–99.
29. Монголина Т.А. Геохимические особенности солевых отложений (накипи) питьевых вод как индикатора природно-техногенного состояния территории: автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2011. – 21 с.
30. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис.... д-ра. биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
31. Наркович Д.В. Элементный состав волос детей как индикатор природно-техногенной обстановки территории (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 21 с.
32. Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых / под ред. М.В. Кочеткова и др. – М.: МПР России, 2000. – 30 с.

Поступила 03.06.2014 г.

UDC 622.34:550.4(071.16)

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL RESEARCH OF NATURAL ENVIRONMENT IN BAKCHAR IRON-ORE DEPOSIT AREA (TOMSK REGION)

Ildar R. Shaykhiev,

JSC «Tomskgazstroy», 21, Bolshaya Podgornaya street, Tomsk, 634009, Russia.

E-mail: ildar.shaihiiev @ mail.ru

Leondi P. Rikhvanov,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,

Tomsk, 634050, Russia. E-mail: rikhvanov@tpu.ru

Currently entering this field in operation will lead to significant changes in geological environment. State of geological survey for geological and economic estimate and commercial development of Bakchar iron site allow confirming that the natural and industrial system at an early stage of development is formed in the area. So, it is possible to explore it. The value of current information describing a kind of natural environment, especially in remote areas, increased. The need to perform a full evaluation of the current geo-ecological state of Bakchar iron-ore deposit environment, identification of major natural and man-made factors forming the ecological and geological environment of the study area and involved in commercial development of resources determine the relevance of the research.

The main aim of the research is to evaluate ecological and geochemical state of Bachar area according to a comprehensive study of natural environments at the initial stage of development of natural and man-made system associated with the proposed exploration of Bakchar mine.

Methods and types of research: neutron activation analysis, emission spectral semi-quantitative analysis, atmogeochemical (sampling of snow cover), lithogeochemical (sampling of soil), hydrogeochemical (sampling of surface and groundwater), gidrolitogeochemical (sampling of sediments), biogeochemical (study of biosubstrate – hair of children), radiogeochemical studies (measurement of exposure dose, as well as the content of U, Th and K).

Results. Based on the geochemical studies the authors give the geochemical characteristics of natural environment (soil, dust aerosols, sediments, surface water and groundwater, biosubstrates) which will assess the environmental change in the area of the proposed development of the deposit and use this data to monitor the organization.

Key words:

Ecological-geochemical monitoring, soil, dust aerosols, sediments, surface water and groundwater, biological substrates, deposit, iron ore.

The authors give thanks to all participants of the work for help. The works were carried out according to the contract between Tomsk Polytechnic University and Tomsk Mining Company.

REFERENCES

1. *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii* [Geology and Mineral Resources of Russia]. Ed. by A.E. Kontorovich, V.S. Surkov. Saint Petersburg, VSEGEI Publ., 2000. Vol. 2, pp. 129–133.
2. Babin A.A. *Bakcharskoe zhelezorudnoe mestorozhdenie (geologiya, zakonomernosti razmesheniya i genezis zheleznykh rud)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Bakcharskoye mine (geology, patterns of distribution and genesis of iron ore). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1969. 248 p.
3. *Zapadno-Sibirskiy zhelezorudny bassey*n [West Siberian iron basin]. Ed. F.N. Shakhov. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences of the USSR, 1964. 448 p.
4. Nikolaeva I.V. *Bakcharskoe mestorozhdenie oolitovykh zheleznykh rud* [Bakchar oolitic iron ore deposit]. Novosibirsk, USSR Academy of Sciences, 1967. 129 p.
5. *Otchet po Goskontraktu № TV-04-04-2006 «Otsenka Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya dlya otrabotki metodom*

- SGD» [Evaluation of Bakcharskoye mine for testing by the SRS]. Tomsk, NPO TomMC Ore, 2009. Vol 1, 152 p.
6. Protodyakonov M.M., Teder R.I., Ilnitskaya E.I. *Raspredelenie i korrelyatsiya pokazateley fizicheskikh svoystv gornyykh porod* [Distribution and correlation of indicators of physical properties of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 192 p.
 7. Teplyakov I.M., Domarenko V.A., Molchanov V.I. *Geotekhnologicheskie metody razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy Zapadno-Sibirskogo basseyna* [Geotechnical methods to develop iron ore deposits in the West Siberian Basin]. *Geologiya i mineralnye resursy Tsentralnoy Sibiri*, 2001, vol. 2, pp. 169–175.
 8. Kopysov S.G. *Parametry ekologicheskoy dopustimoy razrabotki Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya* [Parameters of environmentally acceptable development of Bakcharskoye mine]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2011, no. 5, pp. 420–425.
 9. Ufimtsev K.A. *Pochvy yuzhnoy chasti taezhnoy zony Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Soils of the southern taiga zone of the West Siberian Plain]. Moscow, Kolos Publ., 1974. 202 p.
 10. *Geologo-gidrologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye lista 0–44–29* [Geological and hydrological structure and minerals of the sheet 0–44–29]. *Okonchatelnyy otchet Bakcharskoy geologosemochnoy partii po rabotam za 1962–1964 gg.* (The final report Bakchar geological survey party to work for the years 1962–1964). Tomsk, 1964. Vol. 1.
 11. GOST 17.1.5.01–80. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh obektov dlya analiza na zagryaznennost* [State Standard 17.1.5.01–80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling sediments of water bodies for contamination analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 1984. 7 p.
 12. GOST 17.1.5.05–80. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob poverkhnostnykh i morskikh vod, lda i atmosferykh osadkov* [State Standard 17.1.5.05–80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling surface and sea waters, ice and precipitation]. Moscow, Standartinform publ., 1985. 12 p.
 13. GOST 17.4.1.02–83. *Ohrana prirody. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya* [State Standard 17.4.1.02–83. Nature protection. Soil. Classification of chemical pollution control]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 4 p.
 14. GOST 17.4.4.02–84. *Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [State Standard 17.4.4.02–84. Nature protection. Soil. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 1986. 7 p.
 15. RD 52.04.186–89. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [RD 52.04.186–89. Guidelines for the Control of air pollution]. Moscow, RosHydromet Publ., 1991. 1360 p.
 16. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for assessing the geochemical contamination of cities with chemical elements]. Ed. by Yu.E. Saet, B.A. Revich. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
 17. Glazovskiy N.F. *Tekhnogennyye potoki veshchestv v biosfere* [Man-made flow of substances in biosphere]. *Mining and geochemistry of natural ecosystems*, 1982, pp. 7–28.
 18. Yazikov E.G. *Ekogeokhimiya urbanizirovannykh territoriy yuga Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Dokt. Diss. [Ecogeochemistry of urbanized areas in the south of Western Siberia. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2006. 47 p.
 19. Bowen N.J.M. *Trace elements in biochemistry*. London; New York, Academic Press, 1966. 248 p.
 20. Rikhvanov L.P., Arbuzov S.I., Baranovskaya N.V., Volostnov A.V. *Radioaktivnye elementy v okruzhayushchey srede* [Radioactive elements in the environment]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 128–136.
 21. Rikhvanov L.P., Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A. *Radioaktivnye elementy v uglyakh* [Radioactive elements in coal]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of Intern. Conf.]. Tomsk, 1996. pp. 104–109.
 22. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental Geochemistry]. Ed. by Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin. Moscow, Nedra Publ., 1990. 336 p.
 23. Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika pylevykh atmosferykh vypadeniy na territorii Ob-skogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Material composition and geochemical characteristics of atmospheric deposition of dust on the territory of the Ob basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2001. 22 p.
 24. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of trace elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-Print Publ., 2007. 468 p.
 25. Savichev O.G., Bazanov V.A., Zdvizhkov M.A. *Khimicheskii sostav prirodnikh vod bolotnykh landshtaftov s raznoy stepenyu antropogennoy nagruzki* [Chemical composition of natural waters of the marsh landscape with varying degrees of anthropogenic load]. *Problemy poiskovoy i ekologicheskoy geokhimii Sibiri: Materialy nauchnoy konferentsii* [Search problems and environmental geochemistry of Siberia. Proc. of scientific Conf.]. Tomsk, 2003. pp. 274–276.
 26. Rasskazov N.M. *Otchet po nauchno-issledovatel'skoy teme: Razrabotka metodiki gidrogeologicheskikh i gidrogeokhimicheskikh issledovaniy na razlichnykh stadiyakh razvedki torfyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri* [Development of methodology of hydrogeological and hydrogeochemical studies at various stages of exploration of peat fields in Western Siberia]. Tomsk, 1968. 116 p.
 27. Zdvizhkov M.A. *Gidrogeokhimiya Vasyuganskogo bolotnogo massiva*. Dis. Kand. nauk [Hydrogeochemistry of Vasyuganskoye bog. Cand. Dis.]. Tomsk, 2005. 175 p.
 28. Bronzov A.Ya. *Verkhovyye bolota Narymskogo kraya (basseyn r. Vasyugan)* [Upland marshes of Narym edge (basin of Vasyugan)]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo torfyanogo instituta* [Proc. of the Research peat Institute]. Moscow, 1930. Vol. 3, pp. 1–99.
 29. Mongolina T.A. *Geokhimicheskie osobennosti soleykh otlozheniy (nakipi) pitevykh vod kak indikatora prirodno-tekhnogennogo sostoyaniya territorii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemical characteristics of salt deposits (scale) of drinking water as an indicator of natural and man-made state territory. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 21 p.
 30. Baranovskaya N.V. *Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnikh i prirodno-antropogennykh ekosistem*. Avtoref. Dis. Dokt. nauk [Laws of accumulation and distribution of chemical elements in the body of natural and natural-anthropogenic ecosystems. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
 31. Narkovich D.V. *Elementnyy sostav volos detey kak indikator prirodno-tekhnogennoy obstanovki territorii (na primere Tomskoy oblasti)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [The elemental composition of children's hair as an indicator of natural and man-made environment territory (by the example of Tomsk region). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 21 p.
 32. *Trebovaniya k monitoringu mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopaemykh* [Requirements for monitoring of solid minerals]. Ed. by M.V. Kochetkov. Moscow, Russian Ministry of Natural Resources, 2000. 30 p.

Received: 03 June 2014.

УДК 621.43

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА НА ПРИМЕРЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ ТУРБОКОМПРЕССОРА ТКР-11

Пассар Андрей Владимирович,

канд. техн. наук, ст. научн. сотр. лаборатории «Численные методы математической физики» Вычислительного центра ДВО РАН, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65. E-mail: passar_av@mail.ru

Тимошенко Денис Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеанского государственного университета, Россия, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: kafdvs@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствовать проточную часть турбины турбокомпрессора комбинированного двигателя внутреннего сгорания.

Цель работы: объединить все положительные стороны существующих математических моделей и методов расчета и проектирования; проектировать комплексно радиально-осевую турбину, работающую в условиях нестационарного потока импульсной системы наддува комбинированного двигателя внутреннего сгорания.

Методы исследования: метод расчета турбины на среднем радиусе, оптимизационный алгоритм метода неопределенных множителей Лагранжа, метод Н. Мидзумати, метод характеристик, метод Центрального научно-исследовательского дизельного института.

Результаты. Представлена численная реализация комплексного метода расчета на примере проточной части радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-11, работающего в составе комбинированного двигателя. Приведено сравнение турбин, спроектированных с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа, с турбинами, спроектированными с помощью метода Н. Мидзумати. Представлены характеристики турбин в стационарном потоке. На основе этих характеристик показано, что турбины, в основу проектирования которых положен метод Н. Мидзумати, несколько эффективнее турбин, спроектированных с помощью метода множителей Лагранжа, но уступают последним по эффективной мощности. Приведены характеристики турбин в нестационарном потоке комбинированного двигателя. На основе этих характеристик показано, что турбины, спроектированные с помощью метода Н. Мидзумати, эффективнее турбин, спроектированных с помощью метода множителей Лагранжа. При работе в составе комбинированного двигателя турбины, спроектированные с помощью метода Н. Мидзумати, уступают по эффективной мощности турбинам, спроектированным с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа. В результате численной реализации комплексного метода расчета получен геометрический аналог проточной части турбины турбокомпрессора ТКР-11, который при работе в составе комбинированного двигателя позволит эффективно использовать нестационарный поток со стороны поршневой части и тем самым снизить удельный расход топлива.

Ключевые слова:

Комплексный метод расчета, степень радиальности, степень реактивности, коэффициент напора, характеристики турбины, проточная часть, радиально-осевая турбина.

Введение

В настоящее время можно констатировать, что газотурбинный наддув дизелей нашел повсеместное применение в комбинированных двигателях внутреннего сгорания. Однако использование наддувочного агрегата – турбокомпрессора в поршневых двигателях – породило ряд проблем. Одна из главных – проектирование проточных частей турбины, работающей в специфических нестационарных условиях. Следует отметить, что теория турбомашин хорошо разработана только лишь для стационарного обтекания лопаток и не приспособлена для турбин комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

Также хорошо известно, что проточная часть турбины оказывает существенное влияние не только на систему наддува, но и на эффективность комбинированного поршневого двигателя в целом. Причем по степени влияния на эффективность поршневых двигателей газотурбинный наддув оказывает самое существенное влияние по сравнению с другими системами двигателей. Это хорошо иллю-

стрируются рядом уже выполненных работ [1–6], показывающих, что за счет изменения геометрии проточной части турбины можно добиться снижения удельного эффективного расхода топлива на 6–8 г/кВт·ч на номинальном режиме. Необходимо отметить, что и это далеко не окончательный результат, так как в выполненных исследованиях полученный эффект базируется на интуитивном подходе при воздействии на геометрию проточной части турбины. Такой подход, как известно, узаконен среди специалистов в области двигателей внутреннего сгорания. Это связано, прежде всего, с тем, что в настоящее время отсутствует хорошо отработанный метод профилирования проточной части турбины на стадии проектирования.

Основываясь на анализе существующих методов расчета турбин, в работах [7, 8] был предложен комплексный метод к проектированию проточной части радиально-осевой турбины, работающей в условиях нестационарного потока.

В настоящей работе будет представлен технологический процесс проектирования проточной ча-

сти турбины турбокомпрессора ТКР-11 для форсированного дизеля 6 ЧН 12/14. Двигатель оборудован двухтрубной импульсной системой наддува и двухзаходной турбиной. Схема системы представлена на рис. 1. Подобные системы широко используются в практике отечественного конструирования для 6-ти и 12-ти цилиндровых V-образных дизелей со средним эффективным давлением $p_{me}=0,9-1,7$ МПа (для V-образных дизелей при условии установки отдельных турбокомпрессоров для каждого ряда цилиндров). Это судовые, стационарные и тепловозные средне- и высокооборотные дизели 6 ЧН 12/14, 6 ЧН 18/22, 12 ЧН 18/20, 6 ЧН 21/21, ЧН 36/45; автомобильные дизели 6 ЧН 13/14, 12 ЧН 13/14 и ряд других.

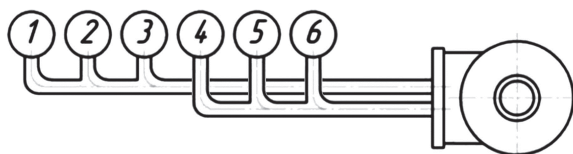


Рис. 1. Схема системы наддува двигателя 6 ЧН 12/14

Fig. 1. Diagram of 6 ChN 12/14 engine pressurization system

Изменение конструкции и геометрии импульсной выпускной системы, а именно места расположения турбокомпрессора, длин и диаметров трубопроводов, в пределах определенных опытом создания данных систем не приводит к значительным принципиальным изменениям газодинамических процессов в выпускных трубопроводах и рабочего процесса двигателя в целом. Характер изменения давлений в различных участках выпускных трубопроводов четырехтактных двигателей практически одинаков. Наблюдается некоторый фазовый сдвиг, определяемый скоростью распространения слабых возмущений в потоке газа. Ряд экспериментальных исследований это подтверждает.

Исследования по совершенствованию конструкции двухтрубной импульсной системы наддува дизеля 6 ЧН 18/22 (p_{me} до 1,7 МПа, $n=1000$ мин⁻¹, турбокомпрессор расположен на торце двигателя) [9] показали следующее. Изменение объемов короткого и длинного трубопроводов в пределах конструктивных возможностей (приблизительно в 2 раза) сопровождается изменением расхода воздуха всего на 1–1,5 % и температуры газов у турбины до 3 %, при практически постоянном среднем индикаторном давлении.

В работе [10] исследовался разгон дизеля 6 ЧН 24/27 ($p_{me}=1,32$ МПа, $n=1000$ мин⁻¹) с двухтрубными импульсными системами различной конструкции: турбокомпрессор в середине двигателя (два одинаковых трубопровода объемом по 0,023 м³), турбокомпрессор на торце двигателя (трубопроводы разной длины объемом 0,023 и 0,032 м³). Система меньшего объема обеспечила снижение длительности всего на 3 с (с 22 до 19 с).

В монографии [11] выполнен анализ экспериментальных исследований газодинамических процессов в выпускных системах четырехтактных ди-

зелей и сделан вывод об отсутствии в выпускных коллекторах скачков уплотнений и ударных волн, могущих быть причиной значительных колебаний давления в различных частях выпускного тракта.

Исследования системы наддува дизеля 8 ЧН 18/22 ($p_{me}=0,84$ МПа, $n=750$ мин⁻¹, система имеет четыре выпускных трубопровода, турбокомпрессор расположен на торце двигателя) [9] хорошо демонстрируют особенности изменения давления в различных участках выпускного трубопровода. В зоне выпускного клапана и на входе в турбину максимальные давления в импульсах составляют 0,2 МПа, минимальные 0,13 МПа и 0,11 МПа соответственно. Формы импульсов давлений практически одинаковы, между импульсами наблюдается сдвиг порядка 340–360 градусов угла поворота коленчатого вала.

Судовые и стационарные дизельные двигатели с наддувом характеризуются повышенными значениями коэффициента избытка воздуха на всех режимах (1,8–2,3 на номинальном и близком к нему режимах). Поэтому при работе на дизельном топливе толщина отложений в проточной части турбины невелика и между ревизиями турбокомпрессора достигает 0,1–0,15 мм на рабочих и до 0,3 мм на сопловых лопатках [12], что практически не влияет на пропускную способность. При работе дизеля на тяжелом топливе, несоблюдении правил эксплуатации, значительных износах поршневой части, подшипников и уплотнений турбокомпрессора толщина отложений может резко возрастать. Но в представленной статье рассматривается технология проектирования проточной части, что не предполагает учета всех особенностей реальной эксплуатации двигателя.

Следует оговориться, что здесь не рассматривается этап – оценка проектного решения на базе расчета осесимметричного вихревого потока невязкой сжимаемой жидкости в проточной части радиально-осевой турбины (метод Я.А. Сироткина [13–15]). На данном этапе есть особенности, которые целесообразно представить в последующих работах.

Постановка задачи

Предложенный комплексный метод к проектированию проточной части радиально-осевой турбины комбинированного двигателя состоит из четырех этапов.

На *первом этапе* производится проектирование проточных частей радиально-осевой турбины с различными геометрическими параметрами.

Второй этап заключается в определении эффективности проточных частей турбин, спроектированных на первом этапе. С этой целью, используя модель расчета ступени на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении [16–18], выполняется расчет характеристик турбины: КПД турбины $\eta_t=f(\bar{H}_t)$ и эффективная мощность $N_t=f(\bar{H}_t)$, где $\bar{H}_t$ – коэффициент напора. Проверка адекватности предложенной модели осу-

ществлялась путем сравнения заводских характеристик, полученных экспериментально, с расчетными характеристиками [8]. Расчет коэффициентов потерь энергии производился по зависимостям, предложенным в работе [19].

Третий этап заключается в расчете импульсов давлений $p_0^*=f(\varphi)$ и температур $T_0^*=f(\varphi)$ на входе в турбину с геометрическими параметрами, определенными на первом и втором этапах. Для реализации третьего этапа используется смешанная задача Коши для выпускной системы комбинированного двигателя с использованием метода характеристик.

Четвертый этап включает в себя решение вопроса об оценке эффективности срабатывания выпускных газов в турбине. В основу программы расчета на этом этапе положен метод расчета турбины в импульсном потоке, широко распространенный среди специалистов как метод Центрального научно-исследовательского дизельного института [20, 21], либо метод расчета турбины на среднем радиусе. В качестве исходной информации на этом этапе используются диаграммы изменения давления и температуры выпускных газов перед турбиной, полученные расчетным путем на предыдущем этапе. Выполнив расчет различных конструктивных вариантов турбины, определяем максимальное значение коэффициента использования импульса $\eta_{\text{тн}}$, максимальное значение мощности турбины $H_{\text{т}}$ и соответствующие этим значениям проточные части турбины.

Коэффициент использования в турбине располагаемой энергии пульсирующего потока газов определяется по формуле

$$\eta_{\text{от}} = \frac{\int_0^{\tau} H_{\text{от}} G_{\text{от}} \eta_{\text{от}} d\tau}{\int_0^{\tau} H_{\text{от}} G_{\text{от}} d\tau}, \quad (1)$$

где $H_{\text{т}}$ – мгновенное значение изоэнтальпийного теплотерпада от полных параметров перед турбиной до статического давления за турбиной, Дж/кг; $G_{\text{т}}$ – мгновенные значения расхода выпускных газов, кг/с; $\eta_{\text{т}}$ – мгновенные значения эффективного КПД турбины; τ – время импульса.

Мгновенные значения эффективной мощности турбины определяются по формуле

$$N_{\text{от}} = \int_0^{\tau} \frac{H_{\text{от}} G_{\text{от}} \eta_{\text{от}} d\tau}{1000}. \quad (2)$$

Дальнейшие расчетные исследования проводились в соответствии с содержанием этапов комплексного метода.

Во многих задачах на разыскание наибольших и наименьших значений функции вопрос сводится к разысканию максимумов и минимумов функции от нескольких переменных, которые не являются независимыми, а связаны друг с другом некоторыми добавочными условиями (например, они должны удовлетворять данным уравнениям). Такие

задачи позволяет выполнить метод множителей Лагранжа [22–25].

При выборе геометрии проточной части турбины необходим подбор оптимальных параметров: степени реактивности ρ , относительной окружной скорости $\bar{u}_1 = u_1/c_{\text{ад}}$ и параметра $m = (u_2/w_2) \cos \beta$, характеризующего элементы треугольника скоростей на выходе из турбины. Для решения этой задачи в работах [22–25] предлагается использовать метод множителей Лагранжа.

При выборе оптимальных параметров используется функция Лагранжа в следующем виде:

$$L(\bar{u}_1, \rho, m, \lambda) = \eta_u(\bar{u}_1, \rho, m, \lambda) + \lambda f(\bar{u}_1, \rho, m),$$

где λ – неопределенный множитель; η_u – окружной КПД ступени; $f(\bar{u}_1, \rho, m)$ – уравнение связи параметров $\bar{u}_1$, ρ и m .

$$\eta_u = 1 - (1 - \rho)(1 - \varphi^2) + \mu^2 \bar{u}_1^2 \left(\cos^2 \beta \frac{1 - 2\psi^2 m}{\psi^2 m^2} + 1 \right);$$

$$f(\bar{u}_1, \rho, m) = \mu^2 \bar{u}_1^2 \left(\frac{\cos^2 \beta}{m} - \psi^2 \right) - \psi^2 + (1 - \rho) \times \\ \times (1 - \varphi^2) \psi^2 + 2\bar{u}_1 \cos \alpha_1 \varphi \psi^2 \sqrt{1 - \rho}.$$

Условиями максимума являются

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{u}_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \rho} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial m} = 0; \quad f = 0.$$

Из условий максимума определяются оптимальные параметры:

$$\lambda = \frac{1 - m\psi^2}{\psi^2};$$

$$\rho_{\text{opt}} = 1 - \left[\frac{(1 - m\psi^2) \varphi \cos \alpha_1 \bar{u}_1}{m\psi^2 (1 - \varphi^2)} \right]^2; \quad (3)$$

$$m_{\text{opt}} = \frac{1}{\psi^2} \left[1 - \sqrt{\frac{\mu^2 (1 - \varphi^2) (1 - \cos^2 \beta_2 \psi^2)}{\cos^2 \alpha_1 \varphi^2 + \mu^2 (1 - \varphi^2)}} \right]; \quad (4)$$

$$\bar{u}_{1\text{opt}} = \frac{\psi}{\sqrt{\mu^2 \left(\frac{\cos^2 \beta_2}{m^2} - \psi^2 \right) + \frac{(1 - m^2 \psi^4) \varphi^2 \cos^2 \alpha_1}{m^2 \psi^2 (1 - \varphi^2)}}}. \quad (5)$$

Результаты

Результаты реализации первого этапа. Поскольку на данном этапе проведения расчетов геометрия проточной части неизвестна, определить потери работоспособности газа не представляется возможным. Поэтому предварительно были приняты следующие значения коэффициентов скорости: в направляющем аппарате $\varphi=0,95$; в рабочем колесе $\psi=0,9$.

Для исходных значений $\alpha_1=18^\circ$; $\beta_2=36^\circ$; $\mu=0,52$; $\varphi=0,95$; $\psi=0,9$ по уравнениям (3)–(5) получаем: $m_{\text{opt}}=1,085$; $\bar{u}_1=0,648$; $\rho_{\text{opt}}=0,315$.

Для найденных оптимальных значений параметров с использованием модели расчета ступени

на среднем радиусе в обратной постановке были рассчитаны высоты лопаток на входе l_1 и выходе из рабочего колеса l_2 . Высоты лопаток были определены на расход газа $G_{т.расч}=0,25$ кг/с и степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,509$ – турбина № 1; $\pi_{т.расч}=1,698$ – турбина № 2; $\pi_{т.расч}=1,887$ – турбина № 3; $\pi_{т.расч}=2,075$ – турбина № 4.

По результатам проведенного расчета построена проточная часть рабочего колеса и определена длина средней линии профиля. Далее, используя модель расчета ступени на среднем радиусе в прямой постановке, уточнены коэффициенты скорости и расход рабочего тела. Теперь с новыми коэффициентами скорости по формулам (3)–(5) уточняем параметры: $m_{опт}$; $\bar{u}_1$; $\rho_{опт}$. Далее, используя модель расчета ступени на среднем радиусе в обратной постановке, вновь рассчитаны высоты лопаток на входе l_1 и выходе из рабочего колеса l_2 . По результатам проведенного расчета построена проточная часть рабочего колеса рис. 2.

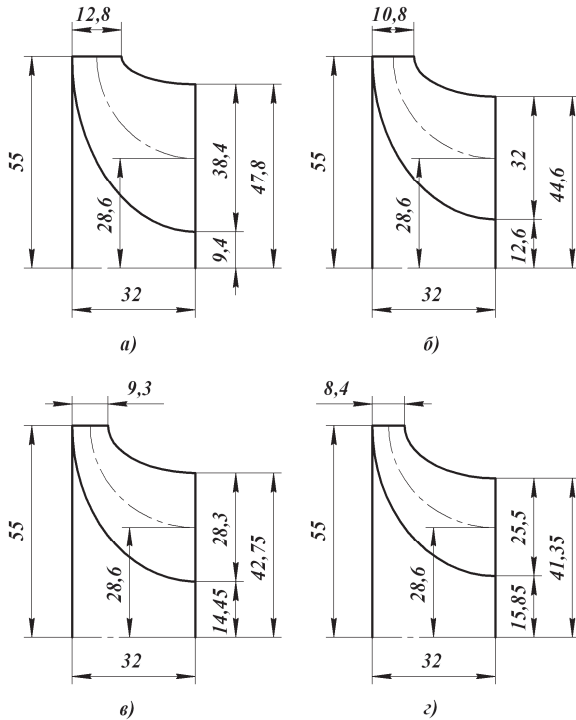


Рис. 2. Рабочие колеса турбины ТКР-11, спроектированные с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа: а) турбина № 1, $n_{тк}=51041$ мин⁻¹; б) турбина № 2, $n_{тк}=58279$ мин⁻¹; в) турбина № 3, $n_{тк}=64289$ мин⁻¹; г) турбина № 4, $n_{тк}=69302$ мин⁻¹

Fig. 2. TKR-11 turbine wheels designed using Lagrange multiplier method: а) turbine № 1, $n_{тк}=51041$ мин⁻¹; б) turbine № 2, $n_{тк}=58279$ мин⁻¹; в) turbine № 3, $n_{тк}=64289$ мин⁻¹; г) turbine № 4, $n_{тк}=69302$ мин⁻¹

Рабочий процесс в турбине с прямыми радиальными лопатками описывается посредством уравнений момента количества движения, расхода и энергии в сопловом аппарате и рабочем колесе.

Необходимо отметить, что значительную долю потерь в проточной части турбины составляют отрывные потери на входе в рабочее колесо, свя-

занные с углом атаки, а также потери с выходной скоростью. Для минимизации этих потерь в проектном расчете Н. Мидзумати [26] принял прямоугольные планы скоростей на входе и выходе из турбины. Если преобразовать вышеперечисленные уравнения с учетом прямоугольных планов скоростей, то можно получить уравнения для расчета геометрических параметров турбины [27]. Используя эти уравнения, был выполнен проектный расчет ступени радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-11.

Высота лопатки соплового аппарата определяется по формуле

$$l_1 = \frac{qR_1[1-\varphi^2(1-s)]}{\varphi\sqrt{\frac{2}{k-1}}\varepsilon_1\sin\alpha_1\left(\frac{p_1}{p_0}\right)\sqrt{1-s}}, \quad (6)$$

где $q = \frac{G_0}{2\pi R_1^2 a_0 \rho_0}$ – характеристическая величина

расхода газов; $s = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ – отношение давлений в

сопловом аппарате; ε_1 – поправочный коэффициент на толщину лопаток; φ – коэффициент скорости; R_1 – радиус рабочего колеса, определяемый типоразмером турбины; k – показатель адиабаты; a_0 – скорость звука на входе в турбину.

Радиус на выходе из рабочего колеса определяется по формуле

$$R_{20} = \sqrt{\frac{2\theta\left(\frac{a_0}{u_1}\right)^2 - (1+\psi_1^2)}{\left(\frac{1}{\psi_2^2} - 1\right)}} R_1^2, \quad (7)$$

где ψ_1 – коэффициент относительной скорости на входе в рабочее колесо $w_1=w_{1t}\psi_1$; w_{1t} – теоретическая скорость на входе в рабочее колесо; ψ_2 – коэффициент скорости в рабочем колесе $w_2=w_{2t}\psi_2$; w_{2t} – теоретическая скорость на выходе из рабочего колеса;

$\theta = 1 - \varphi^2(1-\psi_1)(1-s) - s_0\left(\frac{1-\varphi^2}{s} + \varphi^2\right)$; $s_0 = \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

– отношение давлений в ступени;

$$u_1 = a_0\varphi\sqrt{\frac{2}{k-1}}\cos\alpha_1\sqrt{1-s}$$

– окружная скорость на входе в рабочее колесо.

Радиус втулки рабочего колеса

$$R_{2i} = 0,2R_1. \quad (8)$$

Угол относительной скорости газа на выходе из рабочего колеса

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \sqrt{1-\psi_2^2}\sqrt{\left(\frac{R_{20}}{R}\right)^2 - 1}. \quad (9)$$

Используя уравнения (6)–(9), были спроектированы рабочие колеса на расход газа $G_{т.расч}=0,25$ кг/с и степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,509$ – турбина № 1М; $\pi_{т.расч}=1,698$ – турбина № 2М; $\pi_{т.расч}=1,887$ – турбина № 3М; $\pi_{т.расч}=2,075$ – турбина № 4М. Результаты расчета представлены на рис. 3.

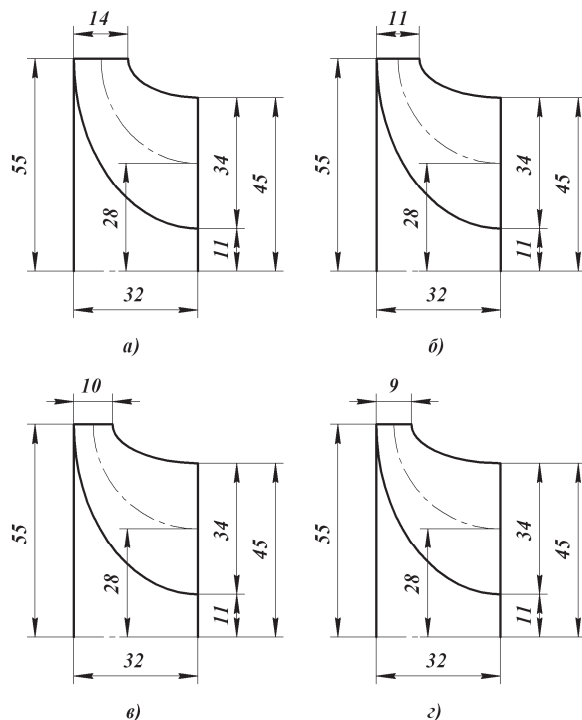


Рис. 3. Рабочие колеса турбины ТКР-11, спроектированные с использованием метода Н. Мидзумати: а) турбина № 1М, $n_k=48169$ мин⁻¹; б) турбина № 2М, $n_k=54236$ мин⁻¹; в) турбина № 3М, $n_k=59009$ мин⁻¹; г) турбина № 4М, $n_k=62921$ мин⁻¹

Fig. 3. TKR-11 turbine wheels designed using N. Midzumati method: а) turbine № 1M, $n_k=48169$ min⁻¹; б) turbine № 2M, $n_k=54236$ min⁻¹; в) turbine № 3M, $n_k=59009$ min⁻¹; г) turbine № 4M, $n_k=62921$ min⁻¹

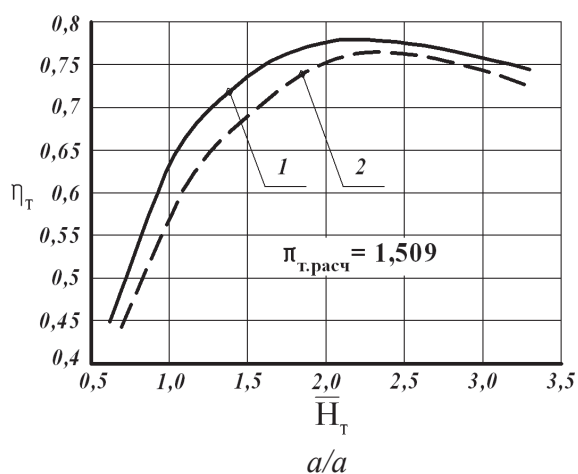


Рис. 4. Характеристики турбины ТКР-11 $\pi_{т.расч}=1,509$: а) изменение КПД турбины η_t ; б) изменение эффективной мощности турбины N_t ; 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 1М

Fig. 4. Features of turbine TKR-11 $\pi_{т.расч}=1,509$: а) change of turbine efficiency η_t ; б) change of turbine effective capacity N_t ; 1 is turbine № 1; 2 is turbine № 1М

Результаты реализации второго этапа. При реализации второго этапа получены результаты расчета характеристик турбины, которые показали следующее.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,509$ (рис. 4, а, б).

1) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ турбина № 1 эффективнее турбины № 1М (рис. 4, а).

2) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ эффективная мощность турбин N_t возрастает. Мощность турбины № 1 превышает мощность турбины № 1М (рис. 4, б).

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,698$ (рис. 5, а, б).

1) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ турбина № 2 и турбина № 2М развивают примерно равный КПД η_t (рис. 5, а).

2) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ эффективная мощность турбин N_t возрастает. Мощность турбины № 2 превышает мощность турбины № 2М (рис. 5, б).

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,887$ (рис. 6, а, б).

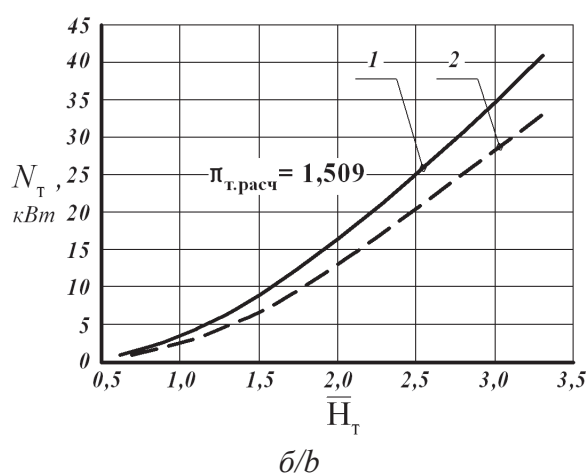
1) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ турбина № 3М эффективнее турбины № 3 (рис. 6, а).

2) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ эффективная мощность турбин N_t возрастает. Мощность турбины № 3 превышает мощность турбины № 3М (рис. 6, б).

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=2,075$ (рис. 7, а, б).

1) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ турбина № 4М эффективнее турбины № 4 (рис. 7, а).

2) Во всем диапазоне изменения коэффициента напора $\bar{H}_t$ эффективная мощность турбин N_t возрастает. Мощность турбины № 4 превышает мощность турбины № 4М (рис. 7, б).



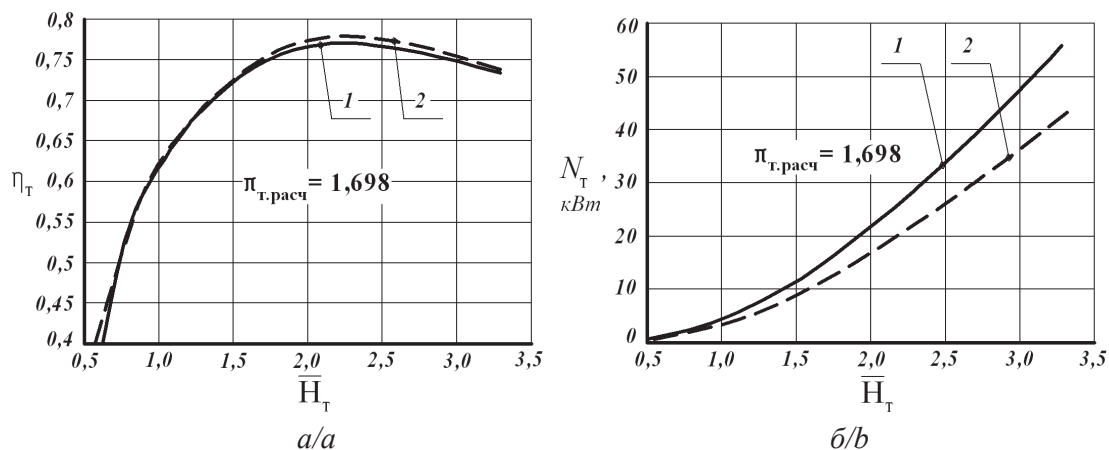


Рис. 5. Характеристики турбины ТКР-11 $\pi_{т.расч}=1,698$: а) изменение КПД турбины η_t ; б) изменение эффективной мощности турбины N_t ; 1 – турбина № 2; 2 – турбина № 2М

Fig. 5. Features of turbine TKR-11 $\pi_{т.расч}=1,698$: а) change of turbine efficiency η_t ; б) change of turbine effective capacity N_t ; 1 is turbine № 2; 2 is turbine № 2М

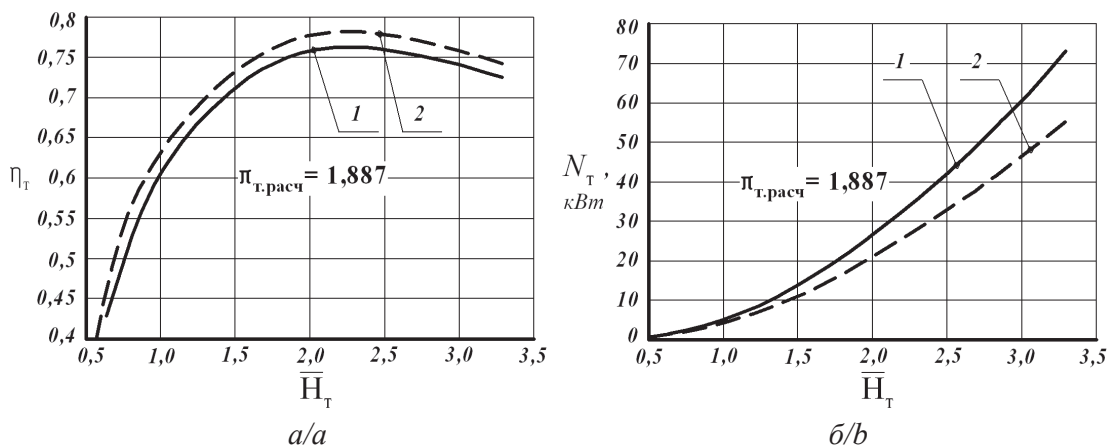


Рис. 6. Характеристики турбины ТКР-11 $\pi_{т.расч}=1,887$: а) изменение КПД турбины η_t ; б) изменение эффективной мощности турбины N_t ; 1 – турбина № 3; 2 – турбина № 3М

Fig. 6. Features of turbine TKR-11 $\pi_{т.расч}=1,887$: а) change of turbine efficiency η_t ; б) change of turbine effective capacity N_t ; 1 is turbine № 3; 2 is turbine № 3М

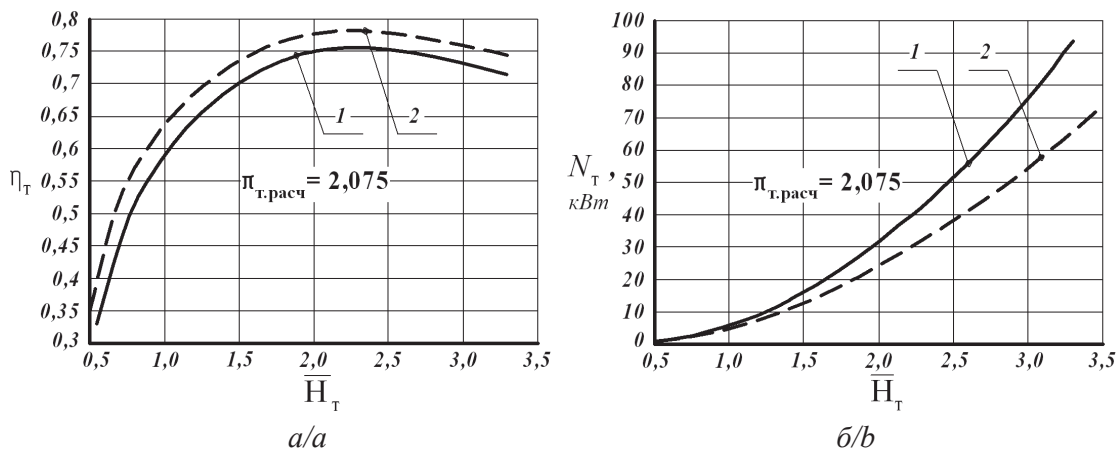


Рис. 7. Характеристики турбины ТКР-11 $\pi_{т.расч}=2,075$: а) изменение КПД турбины η_t ; б) изменение эффективной мощности турбины N_t ; 1 – турбина № 4; 2 – турбина № 4М

Fig. 7. Features of turbine TKR-11 $\pi_{т.расч}=2,075$: а) change of turbine efficiency η_t ; б) change of turbine effective capacity N_t ; 1 is turbine № 4; 2 is turbine № 4М

При реализации второго этапа получены результаты расчета характеристик турбины, которые показали следующее:

1. Турбины, в основу проектирования которых положен метод Н. Мидзумати, эффективнее турбин, спроектированных с помощью метода множителей Лагранжа в случае расчетных режимов $\pi_{т.расч}=1,887$ и $\pi_{т.расч}=2,075$ (рис. 6, а; 7, а), но уступают последним по эффективной мощности (рис. 4, б; 7, б).
2. С уменьшением геометрических размеров на входе и выходе из рабочего колеса эффективная мощность растет (рис. 4, б; 7, б).

Результаты реализации третьего этапа.

В ходе исследований при реализации третьего этапа использовалась программа, составленная на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» Тихоокеанского государственного университета [8]. Программа позволяет производить расчет импульсов давлений $p_0^*=f(\varphi)$ и температур $T_0^*=f(\varphi)$ в выпускном трубопроводе перед турбиной. Адекватность расчета импульса давлений неоднократно проверена в работах [28, 29]. Результаты расчета представлены на рис. 8–11.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,509$ (рис. 8). На рис. 8 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбины № 1 и 1М на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi=74^\circ$ для турбины № 1 и $\Delta\varphi=97^\circ$ для турбины № 1М.

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,698$ (рис. 9). На рис. 9 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбины № 2 и 2М на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi=48^\circ 30'$ для турбины № 2 и $\Delta\varphi=69^\circ 30'$ для турбины № 2М.

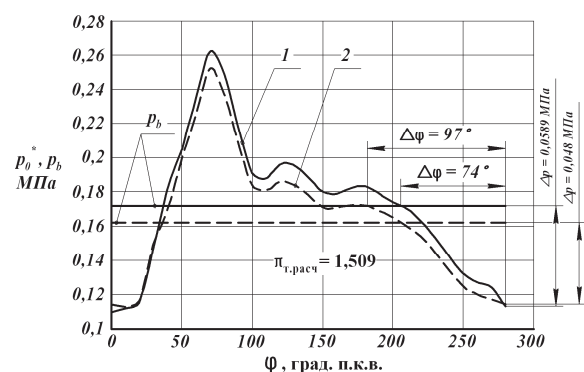


Рис. 8. Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч}=1,509$: 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 1М

Fig. 8. Pressure pulse in outlet pipe p_0^* and boost pressure p_b $\pi_{т.расч}=1,509$: 1 is turbine № 1; 2 is turbine № 1М

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=1,887$ (рис. 10). На рис. 10 приведены диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбины

№ 3 и 3М на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi=44^\circ 30'$ для турбины № 3 и $\Delta\varphi=48^\circ 24'$ для турбины № 3М.

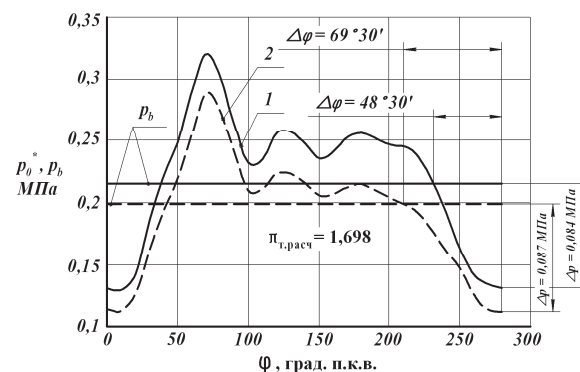


Рис. 9. Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч}=1,698$: 1 – турбина № 2; 2 – турбина № 2М

Fig. 9. Pressure pulse in outlet pipe p_0^* and boost pressure p_b $\pi_{т.расч}=1,698$: 1 is turbine № 2; 2 is turbine № 2М

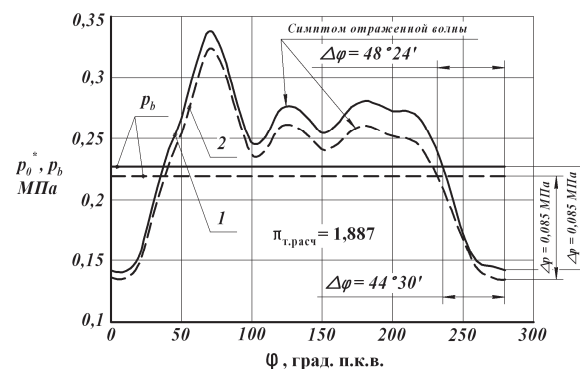


Рис. 10. Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч}=1,887$: 1 – турбина № 3; 2 – турбина № 3М

Fig. 10. Pressure pulse in outlet pipe p_0^* and boost pressure p_b $\pi_{т.расч}=1,887$: 1 is turbine № 3; 2 is turbine № 3М

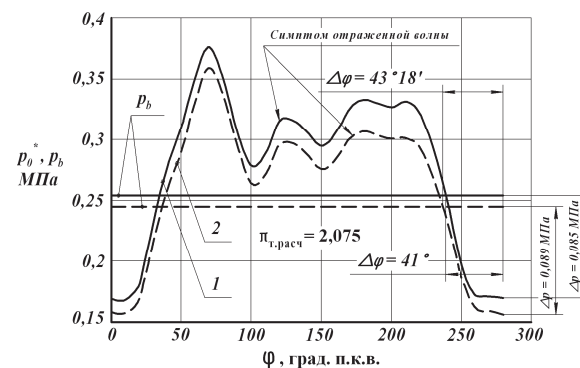


Рис. 11. Импульс давлений в выпускном трубопроводе p_0^* и давление наддува p_b $\pi_{т.расч}=2,075$: 1 – турбина № 4; 2 – турбина № 4М

Fig. 11. Pressure pulse in outlet pipe p_0^* and boost pressure p_b $\pi_{т.расч}=2,075$: 1 is turbine № 4; 2 is turbine № 4М

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=2,075$ (рис. 11). На рис. 11 приведены

диаграммы изменения давления во впускном p_b и выпускном трубопроводе p_0^* на входе в турбины № 4 и 4М на номинальном режиме. Располагаемая продолжительность продувки составила $\Delta\varphi=41^\circ$ для турбины № 4 и $\Delta\varphi=43^\circ 18'$ для турбины № 4М.

Как показали результаты расчета, уменьшение геометрических размеров на входе в турбину приводит к падению располагаемой продолжительности продувки $\Delta\varphi$, к росту давления в выпускном трубопроводе, кривая давления видоизменяется (рис. 10, рис. 11). Понижение давления после максимума происходит более полого, кривая растягивается и обозначается тенденция к образованию отраженной волны. Хорошо известно, что [5] такое изменение кривой давления является нежелательным, так как вызывает ухудшение продувки и наполнения цилиндров и увеличение удельного расхода топлива.

Результаты реализации четвертого этапа. В процессе проведения исследований четвертого этапа дана сравнительная оценка проектных решений проточной части на основании следующих критериев: коэффициента использования располагаемой энергии импульса $\eta_{\text{ти}}$, определенного по зависимости (1) (таблица), и эффективной мощности турбины N_t , определенной по зависимости (2) (рис. 12–15).

Таблица. Результаты расчета коэффициента использования располагаемой энергии импульса

Table. Calculation data of the coefficient of available pulse energy use

№ турбины Turbine	1 ($\pi_{\text{т.расч}}=1,509$)	2 ($\pi_{\text{т.расч}}=1,698$)	3 ($\pi_{\text{т.расч}}=1,887$)	4 ($\pi_{\text{т.расч}}=2,075$)
$\eta_{\text{ти}}$	0,754	0,753	0,744	0,739
№ турбины Turbine	1М ($\pi_{\text{т.расч}}=1,509$)	2М ($\pi_{\text{т.расч}}=1,698$)	3М ($\pi_{\text{т.расч}}=1,887$)	4М ($\pi_{\text{т.расч}}=2,075$)
$\eta_{\text{ти}}$	0,722	0,76	0,765	0,771

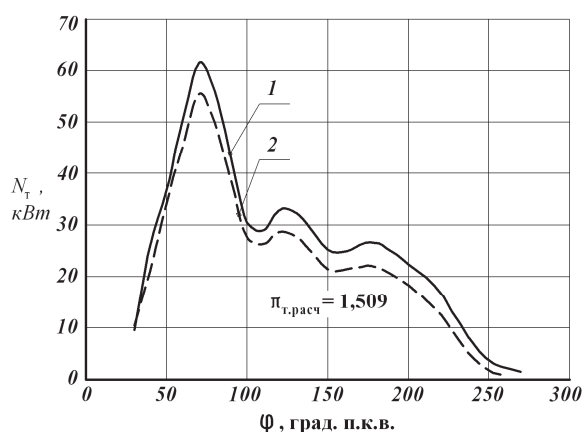


Рис. 12. Эффективная мощность турбин $\pi_{\text{т.расч}}=1,509$: 1 – турбина № 1; 2 – турбина № 1М

Fig. 12. Effective capacity of turbines $\pi_{\text{т.расч}}=1,509$: 1 is turbine № 1; 2 is turbine № 1М

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{\text{т.расч}}=1,509$ (рис. 12).

1) Во всем диапазоне изменения угла поворота коленчатого вала эффективная мощность турбины № 1 превышает эффективную мощность турбины № 1М (рис. 12).

2) Турбина № 1 эффективнее турбины № 1М (таблица).

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{\text{т.расч}}=1,698$ (рис. 13).

1) Во всем диапазоне изменения угла поворота коленчатого вала эффективная мощность турбины № 2 превышает эффективную мощность турбины № 2М (рис. 13).

2) Турбина № 2М эффективнее турбины № 2 (таблица).

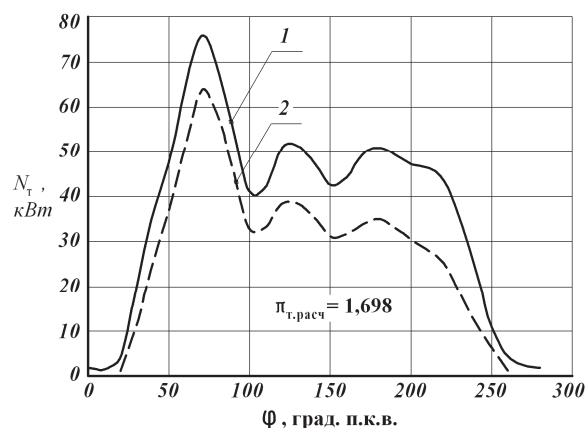


Рис. 13. Эффективная мощность турбин $\pi_{\text{т.расч}}=1,698$: 1 – турбина № 2; 2 – турбина № 2М

Fig. 13. Effective capacity of turbines $\pi_{\text{т.расч}}=1,698$: 1 is turbine № 2; 2 is turbine № 2М

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{\text{т.расч}}=1,887$ (рис. 14).

1) Во всем диапазоне изменения угла поворота коленчатого вала турбина № 3 и турбина № 3М развивают примерно равную эффективную мощность (рис. 14).

2) Турбина № 3М эффективнее турбины № 3 (таблица).

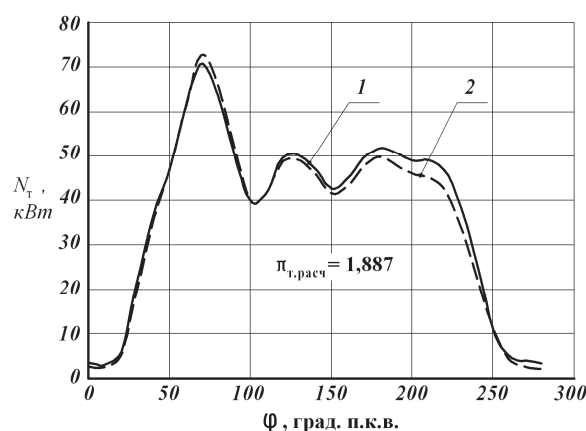


Рис. 14. Эффективная мощность турбин $\pi_{\text{т.расч}}=1,887$: 1 – турбина № 3; 2 – турбина № 3М

Fig. 14. Effective capacity of turbines $\pi_{\text{т.расч}}=1,887$: 1 is turbine № 3; 2 is turbine № 3М

Для расчетных значений степени расширения газов $\pi_{т.расч}=2,075$ (рис. 15).

- 1) Во всем диапазоне изменения угла поворота колесчатого вала турбина № 4 и турбина № 4М развивают примерно равную эффективную мощность (рис. 15).
- 2) Турбина № 4М эффективнее турбины № 4 (таблица).

Результаты расчета показали следующее:

- 1) Наибольшую располагаемую продолжительность продувки $\Delta\varphi=97^\circ$ имеет турбина № 1М, $\pi_{т.расч}=1,509$ (рис. 8), однако эта турбина имеет наименьший коэффициент использования располагаемой энергии импульса $\eta_{тл}=0,722$ (таблица). Наибольший коэффициент использования располагаемой энергии импульса $\eta_{тл}=0,771$ имеет турбина № 4М $\pi_{т.расч}=2,075$ (таблица), однако эта турбина имеет ярко выраженный симптом отраженной волны и наименьшую располагаемую продолжительность продувки $\Delta\varphi=43^\circ 18'$ (рис. 11).

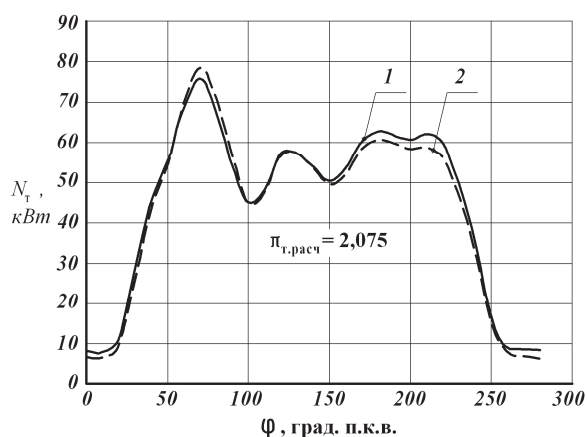


Рис. 15. Эффективная мощность турбин $\pi_{т.расч}=2,075$: 1 — турбина № 4; 2 — турбина № 4М

Fig. 15. Effective capacity of turbines $\pi_{т.расч}=2,075$: 1 is turbine № 4; 2 is turbine № 4М

- 2) Наибольшую эффективную мощность N_t развивают турбина № 4 и турбина № 4М $\pi_{т.расч}=2,075$ (рис. 15), однако, как показали результаты расчета предыдущего этапа, эти турбины имеют ярко выраженный симптом отраженной волны и наименьшую располагаемую продолжительность продувки, $\Delta\varphi=41^\circ$ и $\Delta\varphi=43^\circ 18'$ (рис. 11). Поэтому геометрические параметры проточных частей этих турбин, а также параметры их расчетных режимов являются неприемлемыми для дальнейших исследований.

На основании проведенных расчетов компромиссным решением будет турбина № 2М $\pi_{т.расч}=1,698$ с коэффициентом использования располагаемой энергии импульса $\eta_{тл}=0,76$ (таблица), располагаемой продолжительностью продувки $\Delta\varphi=69^\circ 30'$ (рис. 9).

Выводы

- 1) На основании проведенных исследований по оценке предварительных геометрических параметров и соответственно расчетному режиму выбор сделан на турбине № 2М, спроектированной с помощью метода Н. Мидзумати.
- 2) Турбины, спроектированные с помощью метода Н. Мидзумати, эффективнее турбин, спроектированных с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа, за исключением случая $\pi_{т.расч}=1,509$ (таблица).
- 3) При работе в составе комбинированного двигателя турбины, спроектированные с помощью метода Н. Мидзумати, уступают по эффективной мощности турбинам, спроектированным с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа для расчетных режимов $\pi_{т.расч}=1,509$ и $\pi_{т.расч}=1,698$ (рис. 12, 13). С уменьшением геометрических размеров на входе и выходе из рабочего колеса эффективная мощность турбины N_t растет (рис. 12–15).
- 4) Применение метода Н. Мидзумати на первом этапе комплексного метода расчета можно считать оправданным и рекомендовать его к применению в составе комплексного метода расчета при выборе геометрических параметров проточной части турбины, работающей в составе комбинированного двигателя.
- 5) Анализ полученных результатов показывает, что необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с изучением структуры потока в проточной части радиально-осевой турбины, работающей в составе комбинированного двигателя. Для этого необходимо привлечение пространственных методов расчета турбины, которые позволяют на основе проведенных расчетов построить линии тока в проточной части, а также выявить отрывные зоны как обратный ток в идеальной жидкости.
- 6) Необходимо провести оптимизационные исследования с целью выяснения влияния по возможности наиболее значимых геометрических параметров радиально-осевой турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышенный газотурбинный наддув дизелей семейства ЧН 15/18 / В.М. Рябовол, В.С. Соколов, В.Т. Бордуков, Ю.Т. Еремин, Ю.И. Ивашкин // Труды Центр. науч.-иссл. дизельного ин-та. – 1966. – Вып. 51. – С. 23–39.
2. Межеричский А.Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1971. – 191 с.
3. Скаженник А.М., Гринсберг Ф.Г., Головкин В.Ф. Повышение экономичности двигателя типа Д-70 на неноминальных режимах путем увеличения давления наддува // Двигатели внутреннего сгорания. – 1978. – Вып. 14. – С. 4–6.
4. Левкович С.Л., Шокотов Н.К., Кох Г.А. Влияние КПД турбокомпрессора на показатели четырехтактного двигателя с высоким газотурбинным наддувом при работе по тепловозной характеристике // Двигатели внутреннего сгорания. – 1972. – Вып. 15. – С. 86–94.
5. Симсон А.Э. Газотурбинный наддув дизелей. – М.: Машиностроение, 1964. – 248 с.
6. Лашко В.А., Пассар А.В. Проблемы проектирования проточной части центробежной турбины, работающей в составе импульсной системы наддува КДВС // Актуальные проблемы создания, проектирования и эксплуатации современных двигателей внутреннего сгорания: сб. науч. тр. / под ред. В.А. Лашко. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 3. – С. 119–125.
7. Лашко В.А., Пассар А.В. Метод проектирования проточной части радиально-осевой турбины комбинированного двигателя // Двигателестроение. – 2011. – № 3 (245). – С. 13–19.
8. Пассар А.В., Лашко В.А. Проектирование проточных частей радиально-осевой турбины работающей в условиях нестационарного потока. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 289 с.
9. Повышение технического уровня дизелей ряда ЧН 18/22 / А.И. Каминский, Г.А. Конкс, В.Ф. Мельников, Е.И. Поляков. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.
10. Мурашев О.Д. Влияние объема выпускной системы на переходные процессы тепловозного двигателя // Тепловозы и тепловозные двигатели. Труды ХИИТ. – 1968. – Вып. 104. – С. 22–26.
11. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н.С. Ханнин, Э.В. Аболтин, Б.Ф. Лямцев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
12. Роголев Б.М., Смолин Ю.И. Эксплуатация и ремонт газотурбоагрегатов судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1975. – 192 с.
13. Пассар А.В., Лашко В.А. Аналитический обзор пространственных методов расчета турбины // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № S9. – С. 13–24.
14. Сироткин Я.А. Расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в радиальных турбомашинах // Изв. АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1963. – № 3. – С. 16–28.
15. Лашко В.А., Пассар А.В. Модель Я.А. Сироткина как инструмент для анализа геометрических параметров радиально-осевой турбины комбинированного двигателя // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 43–62.
16. Степанов Г.Ю. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей. – М.: Машгиз, 1958. – 351 с.
17. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. – М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
18. Пассар А.В., Лашко В.А. Аналитический обзор методов расчета турбины на среднем радиусе // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № S9. – С. 2–12.
19. Лашко В.А., Пассар А.В. Расчет потерь кинетической энергии в проточной части турбины как одна из проблем при реализации комплексного подхода // Вестник ТОГУ. – 2011. – № 1 (20). – С. 79–90.
20. Байков Б.П. Особенности расчета турбины, работающей на газах переменного давления // Труды ЦНИДИ. – 1955. – Вып. 28. – С. 68–87.
21. Лашко В.А., Пассар А.В. Оценка эффективности использования располагаемой энергии импульса как одна из проблем при реализации комплексного подхода // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 4 (181). – С. 44–48.
22. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
23. Чумаков Ю.А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей. – М.: ИНФРА-М; Форум, 2012. – 448 с.
24. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центробежной турбины на стационарных и переходных режимах. – М.: Машиностроение, 1974. – 228 с.
25. Розенберг Г.Ш. Центробежные турбины судовых установок. – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
26. Мидзумати Н. Исследование радиальных газовых турбин. – М.: Машгиз, 1961. – 120 с.
27. Пассар А.В., Лашко В.А. Проектирование проточной части радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-14 с использованием теоретических положений профессора Н. Мидзумати // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 4 (31). – С. 129–140.
28. Лашко В.А. Использование фундаментальной теории управления в практике проектирования проточных частей комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 449 с.
29. Лашко В.А. Проектирование проточных частей центробежной турбины комбинированного двигателя внутреннего сгорания. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2000. – 135 с.

Поступила 24.03.2015 г.

UDC 621.43

NUMERICAL IMPLEMENTATION OF THE COMPLEX CALCULATION METHOD ON THE EXAMPLE OF THE TURBINE FLOWING PART IN TKR-11 TURBOCHARGER

Andrey V. Passar,

Cand. Sc., Computer center of Far East branch of the Russian Academy
of Sciences, 65, Kim U Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia.

E-mail: passar_av@mail.ru

Denis V. Timoshenko,

Cand. Sc., Pacific State University, 136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk,
680035, Russia. E-mail: kafds@rambler.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to improve a turbine flowing part in turbocharger of the combined internal combustion engine.

The main aim of the research is to unite all positive parties of existing mathematical models and methods of calculation and design; to design a complex radially-axial turbine working in conditions of a non-stationary stream of pulse system of pressurization of the combined internal combustion engine.

Methods of research: a method of calculation of the turbine on average radius, optimization algorithm of Lagrange uncertain multipliers method, N. Midzumati method, a method of characteristics, a method of the Central research diesel institute.

Results. The paper introduces numerical implementation of a complex calculation method on an example of a flowing part of the radially-axial turbine in TKR-11 turbocharger working in structure of the combined engine. The authors compare the turbines, designed by Lagrange uncertain multipliers, with the turbines, designed by the method of N. Midzumati. The paper introduces the characteristics of the turbines in a stationary stream. Based on these characteristics it is shown that the turbines which design was based on N. Midzumati method are a little bit more effective than the turbines designed by the Lagrange multipliers method, but they are behind the latter in the effective power. The paper introduces the characteristics of the turbines in a non-stationary stream of the combined engine. Based on these characteristics it is shown, that the turbines, designed by the method of N. Midzumati, are more effective than the turbines, designed by the Lagrange multipliers method. When operating in the structure of the combined engine, the turbines, designed by the method of N. Midzumati, are behind the turbines, designed by the Lagrange uncertain multipliers method, in the effective power. As a result of numerical implementation of the complex calculation method the authors obtained the geometrical analogue of the turbine flowing part in TKR-11 turbocharger. When operating in the structure of the complex engine it allows to use effectively non-stationary stream from a piston part and decreasing the specific charge of fuel.

Key words:

Complex method of calculation, degree of radiality, degree of reactance, factor of pressure, turbine characteristics, flowing part, radially-axial turbine.

REFERENCES

1. Ryabovol V.M., Sokolov V.S., Bordukov V.T., Eremin Yu.T., Ivashkin Yu.I. Povysheniy gazoturbinniy nadduv dizeley semeystva CHN 15/18 [Raised gas turbine pressurization of diesel engines of family CHN 15/18]. *Trudy Tsentralnogo nauchno-issledovatel'skogo dizelnogo instituta*, 1966, Iss. 51, pp. 23–39.
2. Mezheritskiy A.D. *Turbokompressory sudovyykh dizeley* [Turbocharger of ship diesel engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1971. 191 p.
3. Skazhenik A.M., Grinsberg F.G., Golovko V.F. Povyshenie ekonomichnosti dvigatelya tipa D-70 na nenominalnykh rezhimakh putem uvelicheniya davleniya nadduva [Increasing the profitability of the D-70 type engine on not nominal modes by rising pressurization pressure]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 1978, Iss. 14, pp. 4–6.
4. Levkovich S.L., Shokotov N.K., Kokh G.A. Vliyaniye KPD turbokompressora na pokazately chetyrekhstaktnogo dvigatelya s vysokim gazoturbinnym nadduvom pri rabote po teplovoy kharakteristike [Influence of turbocharger efficiency on parameters of the four-cycle engine with high gasturbine pressurization at operation under the diesel characteristic]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 1972, Iss. 15, pp. 86–94.
5. Simson A.E. *Gazoturbinniy nadduv dizeley* [Gasturbine pressurization of diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 248 p.
6. Lashko V.A., Passar A.V. Problemy proektirovaniya protochnoy chasti tsentrostremitelnoy turbiny, rabotayushchey v sostave impulsnoy sistemy nadduva KDVS [Problems of designing a flowing part of the centripetal turbine working in the structure of pressurization pulse system KDVS]. *Aktualnye problemy sozdaniya, proektirovaniya i ekspluatatsii sovremennykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: sbornik nauchnykh trudov*. Ed. by V.A. Lashko. Khabarovsk, Khabarovsk State Technical University Press, 2004. Iss. 3, pp. 119–125.
7. Lashko V.A., Passar A.V. Metod proektirovaniya protochnoy chasti radialno-osevoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya [Method of designing a flowing part of the radially-axial turbine of the combined engine]. *Dvigateli*, 2011, no. 3 (245), pp. 13–19.
8. Passar A.V., Lashko V.A. *Proektirovaniye protochnykh chastei radialno-osevoy turbiny, rabotayushchey v usloviyakh nestatsionarnogo potoka* [Designing flowing parts of the radially-axial turbine working in conditions of a non-stationary stream]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2013. 289 p.
9. Kaminskiy A.I., Konks G.A., Melnikov V.F., Polyakov E.I. *Povyshenie tekhnicheskogo urovnya dizeley ryada CHN 18/22* [Increase of a technological level of ChN 18/22 diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 200 p.
10. Murashev O.D. Vliyaniye obema vypusknoy sistemy na perekhodnye protsessy teplovogo dvigatelya [Influence of final system volume on transients of a diesel engine]. *Teplovozy i teplovoznyye dvigateli. Trudy HIIT*, 1968, Iss. 104, pp. 22–26.
11. Khanin N.S., Aboltin E.V., Lyamtsev B.F. *Avtomobilnye dvigateli s turbonadduvom* [Automobile engines with a turbo-supercharging]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 336 p.

12. Rogalev B.M., Smolin Yu.I. *Ekspluatatsiya i remont gazoturbonaghetateley sudovykh dizeley* [Operation and repair of turbocharger ship diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1975. 192 p.
13. Passar A.V., Lashko V.A. Analiticheskiy obzor prostranstvennykh metodov rascheta turbiny [The state-of-the-art review of spatial methods of calculating turbines]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2013, no. S9, pp. 13–24.
14. Sirotkin Ya.A. Raschet osesimmetrichnogo vikhrevogo techeniya nevyazkoy szhimaemoy zhidkosti v radialnykh turbomashinakh [Calculation of axis-symmetry vortical current of nonviscous compressed liquid in radial turbomachines]. *Izv. AN SSSR, OTN, Mekhanika i mashinostroyeniye*, 1963, no. 3, pp. 16–28.
15. Lashko V.A., Passar A.V. Model Ya.A. Sirotkina kak instrumentariy dlya analiza geometricheskikh parametrov radialno-osevoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya [Ya.A. Sirotkin model as toolkit for analyzing geometrical parameters of radially-axial turbine of the combined engine]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye*, 2008, no. 2, pp. 43–62.
16. Stepanov G.Yu. *Osnovy teorii lopatochnykh mashin, kombinirovannykh i gazoturbinnnykh dvigateley* [Bases of the theory of blade machines, combined and gas turbine engines]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 351 p.
17. Sherstyuk A.N., Zaryankin A.E. *Radialno-osevye turbiny maloy moshchnosti* [Low capacity radially-axial turbines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 208 p.
18. Passar A.V., Lashko V.A. Analiticheskiy obzor metodov rascheta turbiny na srednem radiuse [The state-of-the-art review of methods for calculating turbine on average radius]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2013, no. S9, pp. 2–12.
19. Lashko V.A., Passar A.V. Raschet poter kineticheskoy energii v protochnoy chasti turbiny kak odna iz problem pri realizatsii kompleksnogo podkhoda [Calculation of kinetic energy losses in a turbine flowing part as one of the problems when implementing the complex approach]. *Vestnik TOGU*, 2011, no. 1 (20), pp. 79–90.
20. Baykov B.P. Osobennosti rascheta turbiny, rabotayushchey na gazakh peremennogo davleniya [Features of calculation of the turbine operating on gases of variable pressure]. *Trudy TSNIDI*, 1955, Iss. 28, pp. 68–87.
21. Lashko V.A., Passar A.V. Otsenka effektivnosti ispolzovaniya raspolagaemoy energii impulsa kak odna iz problem pri realizatsii kompleksnogo podkhoda [Estimation of efficiency of using pulse available energy as one of the problems when implementing the complex approach]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2012, no. 4 (181), pp. 44–48.
22. Holshchevnikov K.V., Emin O.N., Mitrokhin V.T. *Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin* [Theory and calculation of aviation blades machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 432 p.
23. Chumakov Yu.A. *Teoriya i raschet transportnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Theory and calculation of transport gas turbine engines]. Moscow, INFRA-M; Forum Publ., 2012. 448 p.
24. Mitrokhin V.T. *Vybor parametrov i raschet tsentrostremitelnoy turbiny na statsionarnykh i perekhodnykh rezhimakh* [Choice of parameters and calculation of centripetal turbine on stationary and transitive modes]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 228 p.
25. Rozenberg G.Sh. *Tsentrostremitelnye turbiny sudovykh ustanovok* [Centripetal turbines of ship installations]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1973. 216 p.
26. Midzumati N. *Issledovanie radialnykh gazovykh turbin* [Research of radial gas turbines]. Moscow, Mashgiz Publ., 1961. 120 p.
27. Passar A.V., Lashko V.A. Proektirovaniye protochnoy chasti radialno-osevoy turbiny turbokompressora TKR-14 s ispolzovaniem teoreticheskikh polozheniy professora N. Midzumati [Designing a flowing part of the radially-axial turbine in turbocharger TKR-14 using the theoretical positions of professor N. Midzumati]. *Vestnik TOGU*, 2013, no. 4 (31), pp. 129–140.
28. Lashko V.A. *Ispolzovanie fundamentalnoy teorii upravleniya v praktike proektirovaniya protochnykh chastey kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Use of fundamental theory of management in practice of designing flowing parts of the combined internal combustion engines]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2009. 449 p.
29. Lashko V.A. *Proektirovaniye protochnykh chastey tsentrostremitelnoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Designing flowing parts of the centripetal turbine of the combined internal combustion engine]. Khabarovsk, Khabarovsk State technical University Press, 2000. 135 p.

Received: 24 March 2015.

УДК 550.422(571.51+282.256.3)

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ РЕКИ ЕНИСЕЙ В РАЙОНЕ КРАСНОЯРСКА

Дементьев Дмитрий Владимирович,

канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. радиоэкологии Института биофизики
СО РАН, Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50.
E-mail: dementyev@gmail.com

Болсуновский Александр Яковлевич,

д-р биол. наук, заведующий лаб. радиоэкологии Института биофизики
СО РАН, Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50.
E-mail: radecol@ibp.ru

Борисов Роман Владимирович,

канд. хим. наук, ведущ. инженер лаб. радиоэкологии Института биофизики
СО РАН, Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50; мл. науч.
сотр. Института химии и химической технологии СО РАН, Россия, 660036,
Красноярск, Академгородок, 50/24. E-mail: roma_boris@list.ru

Трофимова Елена Александровна,

мл. науч. сотр. лаб. радиоэкологии Института биофизики СО РАН,
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50.
E-mail: e.trofimova11@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения информации по концентрации химических элементов в донных отложениях р. Енисей в условиях непрерывной антропогенной нагрузки.

Цель работы: определение уровня техногенного загрязнения донных отложений р. Енисей тяжёлыми металлами в районе г. Красноярск.

Методы исследования. Общее содержание металлов (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd) определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС Квант 2А в аналитической лаборатории ИБФ СО РАН. Концентрацию Ca, Fe, Na, Sr, U, Th, Rb, Cs, Eu, La, Sb, Co, Sm, Ce, Ba, Nd, Sc, As, Zn определяли инструментальным нейтронно-активационным анализом на исследовательском реакторе НИ ТПУ (г. Томск).

Результаты. В донных отложениях р. Енисей на участке протяжённостью более 100 км в районе г. Красноярск определено содержание 24 химических элементов. Показано, что распределение тяжёлых металлов имеет неоднородный характер, когда в близлежащих точках концентрации химических элементов в донных отложениях могут отличаться в несколько раз. Концентрации Cd и Ni на некоторых исследованных участках превышают пороговые значения, выше которых для биоты могут проявляться негативные эффекты. Содержание Zn, Cu, Cr и Pb в донных осадках р. Енисей лежит в диапазоне средних значений для речных систем других регионов России. Отмечено, что ниже по течению р. Енисей от г. Красноярск наблюдается повышение концентрации U, Th, Ce, Cs. Для исследованных металлов критических превышений, аномалий или явных закономерностей влияния промышленных предприятий на химический состав донных отложений не выявлено.

Ключевые слова:

Донные отложения, тяжёлые металлы, лантаноиды, актиноиды, мониторинг, река Енисей.

Введение

Мониторинг содержания элементов в водных объектах вблизи агломераций и крупных промышленных предприятий является актуальной проблемой из-за постоянного ухудшения качества вод ввиду загрязнений их тяжёлыми металлами ^{тм}. Однако в реках с высокой скоростью течения показатели содержания металлов в воде не отражают полной картины загрязнения биоты и донных отложений (ДО) металлами [1]. Как правило, концентрации тяжёлых металлов в воде ниже, чем в ДО, что во многом определяется их быстрым переходом из растворенного состояния во взвеси, обладающие высокой сорбционной способностью. Поэтому ДО в русле реки накапливают информацию о

химических загрязнениях, присутствующих в воде [2, 3]. В то же время накопление тяжёлых металлов в ДО в значениях, превышающих фоновые показатели, представляет опасность для качества вод, вследствие возможного выноса микроэлементов из ДО. Таким образом, высокие концентрации тяжёлых металлов в ДО негативно сказываются на биологических компонентах, которые активно аккумулируют из воды химические соединения. Поэтому актуальной задачей является получение сведений о содержании металлов в воде, ДО и гидробионтах, чему посвящено большое количество работ из различных регионов России [1–13] и мира [14–20]. В России на данный момент не существует действующих федеральных нормативных доку-

ментов, которые устанавливают уровни ПДК для тяжёлых металлов в донных отложениях, поэтому для оценки степени загрязнения ДО обычно используют ПДК для почв или воды. Известен региональный норматив [21], разработанный в г. Санкт-Петербург, который позволяет оценить уровни загрязнений ДО водных объектов, но широкого распространения он не получил. Наряду с ПДК, для оценки качества ДО можно использовать подход, основанный на сравнении с фоновыми значениями. Но здесь существуют проблемы как стандартизации подходов к определению фоновых уровней разными авторами, так и недостаточного количества данных для всего многообразия географических объектов. Кроме того, сравнение с фоновыми уровнями не учитывает эффекты переноса и аккумуляции поллютантов в биоте. Существуют зарубежные критерии оценки качества ДО, учитывающие воздействие на живые организмы [14–16]. Авторы предлагают использовать два контрольных уровня концентрации: Threshold Effect Concentration (ТЕС) – пороговая концентрация, ниже которой негативных эффектов не наблюдается, и Probable Effect Concentration (РЕС) – пороговая концентрация, выше которой возможны негативные эффекты.

Целью настоящей работы являлось определение уровня техногенного загрязнения донных отложений р. Енисей тяжёлыми металлами в районе г. Красноярска.

Объекты и методы исследования

Пробы донных отложений отбирали в 2012–2013 гг. на участках р. Енисей (рис. 1): 1) вне зоны влияния промышленных предприятий, выше по течению г. Красноярска (точки ДО1–ДО5); 2) в зоне влияния промышленных стоков – острова в черте Красноярска (точки ДО6–ДО8); 3) ниже по течению от Красноярска (ДО9, с. Есаулово); 4) вблизи населённых пунктов с. Атаманово и с. Б. Балчуг в зоне влияния сбросов Горно-химического комбината ГК Росатом (ГХК) (точки ДО10–ДО17). Расстояние между крайними точками отбора составило 118 км. В указанных точках р. Енисей с глубины до 0,5 м пластиковым пробоотборником отбирали поверхностный слой донных отложений (0–20 см). В лаборатории пробы помещали в стаканы, предварительно удалив крупную гальку, и отстаивали несколько дней, периодически сливая излишки воды. Далее пробы высушивали при температуре 105 °С и просеивали через сито с размером ячейки 0,9 мм.

Общее содержание металлов (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd) в пробах определяли в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36–2002 «Методика измерений валового содержания кадмия, кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, хрома и цинка в почвах, донных отложениях, осадках сточных вод и отходах методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии» на атомно-абсорбционном спектрометре Квант 2А. Измерения выполнены в ана-

литической лаборатории ИБФ СО РАН. Общее содержание элементов Ca, Fe, Na, Sr, U, Th, Rb, Cs, Eu, La, Sb, Co, Sm, Ce, Ba, Nd, Sc, As, Zn определяли инструментальным нейтронно-активационным анализом на исследовательском реакторе ФГАОУ ВО НИ ТПУ (г. Томск).

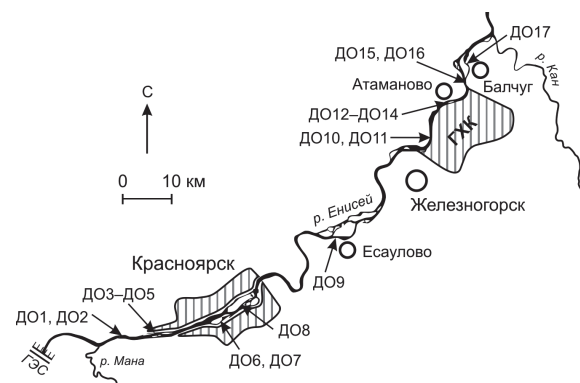


Рис. 1. Карта-схема района отбора проб донных отложений р. Енисей

Fig. 1. Map of the region of sampling bottom sediments of the river Yenisei

Обсуждение результатов и выводы

В табл. 1 представлены данные о содержании Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, As в пробах, отобранных в 2012–2013 гг. Данные элементы являются типичными представителями ТМ, и определение их содержания в ДО рассматривается в большом количестве российских [1, 2, 5, 6, 8–13] и зарубежных [14–20] работ. Степень загрязнения ДО р. Енисей вышеуказанными элементами определяли путём сравнения измеренных концентраций со значениями ПДК [21] и пороговыми уровнями ТЕС и РЕС [15].

В 2012 г. максимальное содержание Zn найдено в точке ДО9 (135,3 мг/кг), которая находится ниже Красноярска, а минимальное зафиксировано в точке ДО12 (45,2 мг/кг). В то же время в точке ДО13 концентрация значительно выше (104,7 мг/кг), чем в ДО12, несмотря на то, что территориально обе пробы отобраны в пределах одного острова. В 2013 г. содержание Zn в ДО было определено двумя разными методами, которые в целом показали хорошую сходимость. Максимальные концентрации Zn были обнаружены в точках ДО3, ДО4 (120,7...125,6 мг/кг), которые лежат выше по течению реки от Красноярска. В точке ДО9 содержание Zn ниже в 2 раза, чем годом ранее; оно составило, согласно результатам разных методов, 54,2...63,7 мг/кг. Таким образом, отмеченные выше изменения концентрации Zn по годам и по точкам отбора могут говорить о неоднородном характере его распределения. Концентрации Zn находятся ниже уровней ПДК и РЕС, незначительное превышение ТЕС зафиксировано в единичных точках (табл. 1). Среднее содержание Zn отражает величины, характерные для сибирских рек [7, 13],

Таблица 1. Содержание тяжёлых металлов в поверхностном слое донных отложений реки Енисей в 2012–2013 гг.**Table 1.** Concentration of heavy metals in surface layer of bottom sediments in the river Yenisei in 2012–2013

Пункт отбора. ДО Sampling point		Концентрация элемента, мг/кг / Element concentration, mg/kg						
		Cu	Ni	Pb	Cd	As	Zn	Cr
		2012/2013				2013	2012/2013	
Красноярск Krasnoyarsk	1	–/12,0	–/28,0	–/7,5	–/0,03	(2,3) ²	–/46,0 (49,1)	–/24,0
	2	–	–	–	–	(2,5)	–/(62,1)	–/–
	3	–/18,4	–/56,6	–/14,3	–/н/о ³	(3,6)	–/94,0 (125,6)	–/18,5
	4	–/20,1	–/58,1	–/26,3	–/0,01	(3,3)	–/(120,7)	–/–
	5	7,6/8,4	28,0/34,3	10,1/14,7	0,75/0,05	(2,5)	55,5/57,3 (79,4)	24,7/25,5
	6	–/7,5	–/19,9	–/3,1	–/н/о	(3,2)	–/34,5 (66,4)	–/9,3
	7	–/10,7	–/27,1	–/5,6	–/н/о	(3,8)	–/30,1 (63,1)	–/17,5
	8	–/8,9	–/25,3	–/7,1	–/н/о	(2,5)	–/47,4 (44,5)	–/11,0
с. Есаулово Esaulovo	9	32,5/8,3	37,3/24,1	38,3/10,7	0,3/н/о	(2,0)	135,3/54,2 (63,7)	14,7/10,7
с. Атаманово Atamanovo	10	11,6/11,8	28,9/24,0	6,0/5,2	0,66/0,08	(3,3)	46,8/43,4 (57,3)	20,5/17,0
	11	9,1/13,4	26,1/27,5	4,6/7,8	н/о/н/о	(2,8)	55,2/63,8 (82,1)	15,1/12,6
	12	6,5/21,3	22,7/32,1	3,3/15,6	н/о/0,07	(5,4)	45,2/78,9 (98,5)	9,3/15,8
	13	25,4/17,6	41,7/26,0	24,8/10,0	1,31/0,37	(3,0)	104,7/63,5 (88,6)	30,1/24,1
	14	8,9/13,5	23,8/27,3	9,9/6,7	н/о/0,02	(3,3)	52,8/58,7 (75,0)	8,5/12,5
с. Б. Балчуг B. Balchug	15	12,0/23,2	33,7/38,8	7,3/10,1	0,78/0,32	(4,2)	75,7/110,8 (90,4)	25,4/27,6
	16	10,2/14,6	29,0/26,4	5,9/9,0	0,63/0,07	(2,9)	58,9/78,4 (90,8)	21,6/10,2
	17	10,7/12,7	38,2/28,5	16,4/6,6	1,06/0,20	(2,7)	110,8/51,2 (58,8)	27,6/23,3
Сред. знач. $\pm$ SD / Average value $\pm$ SD		13,5 $\pm$ 6,2/ 13,9 $\pm$ 4,9	31,0 $\pm$ 6,5/ 31,5 $\pm$ 11,0	12,7 $\pm$ 11,1/ 10,0 $\pm$ 5,6	0,78 $\pm$ 0,32/ 0,12 $\pm$ 0,13	(3,1) $\pm$ (0,8)	74,1 $\pm$ 31,6/ 60,8 $\pm$ 22,0(77,4 $\pm$ 23,1)	19,8 $\pm$ 7,6/ 17,3 $\pm$ 6,3
ТЕС [15]		31,6	22,7	35,8	0,99	9,79	121	43,4
РЕС [15]		149	48,6	128	4,98	33	459	111
ПДК [21]		35	35	530	2	55	480	380

¹ – содержание не определялось; ² – в скобках указаны результаты нейтронно-активационного анализа; ³ н/о – ниже предела обнаружения

¹ concentration was not determined; ² the results of neutron activation analysis are in brackets; ³ н/о below detection limit

р. Урал [2], и его концентрация на исследованном участке р. Енисей изменяется в пределах 30,1...135,3 мг/кг.

Содержание Ni за двухлетний период изменяется в разных точках от 19,9 до 58,1 мг/кг. Наибольшее содержание Ni – 56,6 и 58,1 мг/кг обнаружено для ДО3, ДО4, расположенных выше по течению крупных промышленных предприятий. В то же время можно отметить, что для большинства точек концентрация Ni выше уровня ТЕС (рис. 2), а в некоторых случаях превышает уровни РЕС и ПДК для тяжёлых металлов в донных отложениях. Содержание Ni в одном пункте отбора так же варьируется: для точек ДО12, ДО13 (с. Атаманово) в 2012 г. концентрация отличалась почти в 2 раза (22,7 и 41,7 мг/кг), а в 2013 г. имела близкие значения 32,1 и 26,0 мг/кг, соответственно. Средние значения за 2012–2013 гг. идентичны и составили 31 мг/кг. Похожие результаты по содержанию Ni были получены в работе [7] для рек Сибири (10...40 мг/кг); для ДО водных объектов республики Дагестан (45...121 мг/кг) [6] и Украины (81,7 мг/кг) [18] характерны более высокие концентрации.

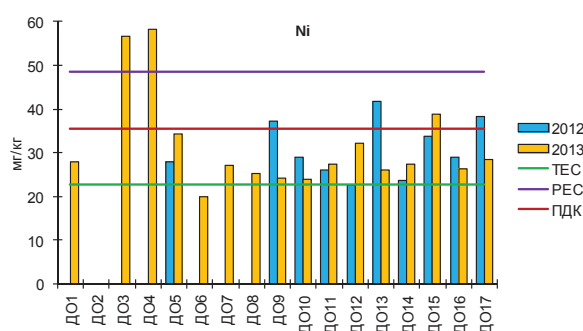


Рис. 2. Сравнение содержания никеля в пробах донных отложений р. Енисей, отобранных в разных районах реки в 2012–2013 гг., с предельными уровнями концентрации

Fig. 2. Comparison of nickel concentration in samples of bottom sediments in the river Yenisei, taken in different regions of the river in 2012–2013, with maximum concentration level

Содержание As в проанализированных пробах не превышает нормативов: минимальное содержание As зафиксировано в точке ДО9 (2,0 мг/кг), наибольшее – в точке ДО12 (5,4 мг/кг), которая на-

ходится в зоне воздействия промышленных предприятий. Для сравнения в ДО р. Северский Донец, протекающей по югу Восточно-Европейской равнины (Россия и Украина), авторами [18] определено содержание As на порядок выше – 75,7 мг/кг.

Средние значения концентраций Cu, Cr и Pb за период между отборами изменились незначительно (в 2012 г. 13,5; 19,8; 12,7 мг/кг и в 2013 г. 13,9; 17,3; 10,0 мг/кг) и не превышают уровней ПДК и РЕС. Однако значения по точкам отбора неоднородны: Cu – 6,5...32,5 мг/кг, Cr – 8,5...30,1 мг/кг, Pb – 3,1...38,3 мг/кг без проявления каких-либо закономерностей. В 2012 г. в точке ДО9, ниже Красноярска, содержание Pb превысило ТЕС – 38,3 мг/кг, а годом позднее составило только 10,7 мг/кг. Как было сказано выше, точки ДО12, ДО13 территориально близки друг к другу, но концентрация Pb отличается в 7,5 раз в 2012 г. (3,3 и 24,8 мг/кг). В 2013 г. содержание Pb в ДО12 в 5 раз выше (15,6 мг/кг), а в ДО13 в 2,5 раза ниже (10,0 мг/кг), чем годом ранее. Содержание Cu, Cr и Pb в донных отложениях р. Енисей не превышает нормативов [21] (для точки ДО9 по содержанию Cu и Pb в 2012 г. можно отметить лишь превышение уровней ТЕС) и находятся в тех же пределах или ниже значений, установленных авторами других работ для р. Амур [5] (Cu до 150 мг/кг, Pb до 160 мг/кг), р. Урал [2] (Cu – 24...48 мг/кг, Pb – 8,8...152,5 мг/кг), р. Васюган [13] (Cu – 28, Cr – 113, Pb – 20 мг/кг). Для сравнения, диапазоны содержания указанных элементов в поверхностных донных отложениях р. Луаньхэ (Китай), для которой характерна высокая степень антропогенной нагрузки, по данным работы авторов [17] составили (мг/кг): Cu – 4,8...37,5, Cr – 61,5...275,3, Pb – 11,5...54,4, Ni – 4,0...58,8, Zn – 58,6...278,6. При этом авторами [17] отмечено, что более высокий уровень загрязнения тяжёлыми металлами наблюдается для проб, отобранных ниже по течению от места сброса стоков. Более высокие концентрации Zn, Cu, Pb, по сравнению с р. Енисей, определены в донных отложениях речных систем Японии [16]: Zn – 381,1, Cu – 133,0, Pb – 40,8 мг/кг.

Концентрация Cd сильно варьируется по годам и точкам отбора, порой превышая пороговые концентрации ТЕС (табл. 1). Максимальные значения в 2012 и 2013 гг. обнаружены для точки ДО13 – 1,31 и 0,31 мг/г соответственно, в то время как в некоторых точках содержание Cd в ДО ниже предела обнаружения. Среднее содержание Cd составило 0,78 мг/кг в 2012 г., что более чем в 6 раз превышает среднее значение за 2013 г. (0,12 мг/кг). Данный факт свидетельствует о наличии повышенной антропогенной нагрузки в 2012 г. Содержание Cd на уровне 0,7...2 мг/кг отмечено авторами [2, 5] для некоторых речных систем России.

В работе [1] дана оценка антропогенного загрязнения р. Енисей в двух точках – выше и ниже Красноярска. Для донных отложений ниже Красноярска авторами [1] показано повышенное содер-

жание Cu, Pb и Zn, но не превышающее уровень негативного воздействия на биоту ТЕС. Сравнивая установленные в настоящей работе концентрации элементов (табл. 1) с результатами, полученными ранее в 1997–2003 гг. [1, 11], можно отметить, что концентрации Ni, Cu, Pb, Zn, Cr находятся в том же диапазоне значений. Распределение указанных элементов в донных отложениях вдоль течения р. Енисей, по всей видимости, имеет «пятнистый» характер, когда концентрации металлов в соседних точках различаются в несколько раз, и не позволяют достоверно оценить уровень антропогенной нагрузки.

В табл. 2 представлены данные о концентрации химических элементов, полученные нейтронно-активационным анализом в пробах, отобранных в 2013 г. Содержание многих из приведённых элементов в р. Енисей ранее не определяли. По предельному содержанию данных элементов в ДО нормативные документы отсутствуют. Поэтому проводили сопоставление результатов, полученных в разных точках между собой. Анализ изменений концентраций U по точкам отбора показал, что серьезных отличий не выявлено. Можно отметить, более высокое среднее содержание U в точках, находящихся в районах населённых пунктов с. Атаманово и с. Б. Балчуг (ДО10–ДО17), но с учётом ошибки среднего эта разница незначительна. Наибольшие значения Th, определённые в точках ДО10, ДО15 (7,8 мг/кг), в 2–2,5 раза превышают минимальные значения Th, обнаруженные в точках ДО7 (3,1 мг/кг), ДО9 (3,5 мг/кг), которые могут быть приняты как фоновые значения по данному элементу для р. Енисей.

Интересная ситуация наблюдается с распределением Sr по точкам отбора. Минимальное значение, зафиксированное для ДО17 (169 мг/кг), в 3–4 раза ниже максимальных значений, обнаруженных в районе островов г. Красноярска ДО6, ДО7 (504 и 789 мг/кг). В остальных точках значения изменяются в диапазоне 200...350 мг/кг. Среднее содержание Sr по всем точкам составило 314 мг/кг, что соответствует диапазонам для других речных систем Сибири, например р. Васюган с притоками – 273 мг/кг [13].

Содержание Cs в районе с. Атаманово и с. Б. Балчуг (ДО11–ДО17) в 1,5–2 раза выше значений по другим точкам. Минимальные значения обнаружены для точек ДО7 и ДО8 (1,2 мг/кг), находящихся в черте Красноярска. Содержания Eu в ДО р. Енисей невелики: минимальное значение обнаружено в точке ДО8 (0,8 мг/кг), а максимальное, как и в случае с Cs, – в точке ДО15 (1,6 мг/кг).

В случае La наименьшие значения обнаружены для точек ДО7 (13,9 мг/кг) и ДО9 (14,6 мг/кг), которые могут быть приняты за фоновые, а наибольшие в точках ДО15 (29,0 мг/кг) и ДО10 (28,0 мг/кг) в 2 раза превышают фон. Средняя концентрация La составила 21,6 мг/кг.

Среднее содержание Sb составляет 0,86 мг/кг, при этом максимальное количество обнаружено в

Таблица 2. Содержание химических элементов в донных отложениях р. Енисей, отобранных в 2013 г.¹**Table 2.** Concentration of chemical elements in bottom sediments of the river Yenisei taken in 2013¹

Пункт отбора Sampling point		Концентрация элемента, мг/кг (г/кг ²)/Element concentration, mg/kg (g/kg ²)																
		Ca	Fe	Na	Sr	U	Th	Rb	Cs	Eu	La	Sb	Co	Sm	Ce	Ba	Nd	Sc
Красноярск Krasnoyarsk	Д01	43,5	30,1	19,1	357	1,5	3,9	38,3	1,4	1,2	19,3	0,72	11,2	3,7	40,5	357	18,7	11,1
	Д02	45,5	35,6	20,3	248	2,1	4,8	48,0	1,7	1,1	22,7	0,80	13,1	4,3	41,3	376	27,8	12,5
	Д03	21,8	32,2	13,5	253	2,7	4,8	51,4	1,6	1,3	23,8	1,03	13,7	4,5	42,6	373	19,6	10,5
	Д04	28,3	30,9	17,5	260	1,9	4,1	48,0	1,4	1,1	20,0	0,93	13,9	3,4	41,9	422	18,3	10,8
	Д05	27,9	36,3	21,3	353	2,0	3,8	53,4	1,3	1,2	17,8	0,84	13,3	3,7	37,4	546	15,0	12,0
	Д06	27,9	31,8	20,4	504	1,8	4,1	49,8	1,7	1,0	21,2	0,92	10,7	3,9	43,2	529	16,5	11,3
	Д07	56,4	32,3	13,6	789	1,9	3,1	44,2	1,2	0,9	13,9	0,75	10,1	3,0	31,7	430	16,1	9,3
	Д08	16,2	26,2	19,6	295	1,3	3,8	53,3	1,2	0,8	16,7	0,82	9,3	3,2	35,4	380	15,2	9,1
с. Есаулово Esaulovo	Д09	19,8	29,2	18,7	306	1,7	3,5	51,1	1,7	1,0	14,6	0,91	10,4	3,1	33,6	421	13,0	9,4
с. Атаманово Atamanovo	Д010	19,7	40,1	19,5	236	1,6	7,8	59,1	1,4	1,4	28,0	0,63	14,2	4,6	57,5	459	21,8	12,3
	Д011	19,9	34,4	19,4	327	3,0	4,8	55,7	2,0	1,0	21,6	0,66	11,8	4,5	47,5	401	26,2	11,9
	Д012	21,1	40,1	17,1	198	3,3	5,7	58,5	2,5	1,4	25,8	0,97	14,7	5,4	54,5	440	24,5	14,0
	Д013	18,6	35,2	16,9	281	2,9	6,0	46,1	2,1	1,4	24,4	1,07	12,9	4,7	53,4	438	27,0	12,7
	Д014	17,9	31,7	18,4	187	2,3	4,6	54,4	2,5	1,0	22,2	1,10	12,7	4,3	45,7	449	20,2	11,5
с. Б. Балчуг B. Balchug	Д015	20,5	44,2	17,3	218	2,3	7,8	68,8	3,0	1,6	29,0	1,23	18,6	5,5	59,7	462	25,8	15,5
	Д016	19,2	35,5	19,9	359	2,6	4,4	64,3	2,5	1,2	24,1	0,61	13,1	4,9	52,4	492	18,7	12,6
	Д017	19,3	35,5	21,1	169	1,7	5,6	48,3	2,0	1,2	22,3	0,71	12,8	4,5	49,0	401	18,9	12,8
Сред. знач. ±SD Average value ±SD		26,0± 11,5	34,2± 4,4	18,4± 2,3	314± 147	2,2± 0,6	4,9± 1,4	52,5± 7,4	1,8± 0,5	1,2± 0,2	21,6± 4,2	0,86± 0,18	12,7± 2,2	4,2± 0,8	45,1± 8,4	434± 53	20,2± 4,6	11,7± 1,7

¹ – результаты получены нейтронно-активационным анализом; ² – концентрация Ca, Fe, Na в г/кг¹ results obtained by neutron activation analysis; ² Ca, Fe, Na concentration in g/kg

точке Д015 (1,23 мг/кг). Содержание Со варьируется от 9,3 (Д08) до 18,6 мг/кг (Д015), что мало отличается от результатов, полученных в 1997–2003 гг. [11], и по порядку значений соответствуют показателям для рек Сибири [13]. Содержание Се в зоне влияния ГХК – Д010–Д017 (45,7...59,7 мг/кг) несколько превосходит значения, найденные выше по течению реки Д01–Д09 (31,7...42,6 мг/кг). Средняя концентрация Се составила 45,1 мг/кг и соответствует среднему значению, полученному для речных систем Японии [16].

Анализ макроэлементов (табл. 2) показал, что содержание Са в 2013 г. выше значений, определенных для р. Енисей ранее [1, 11]. При среднем значении 26,0 г/кг, наибольшие концентрации зафиксированы в точках Д01, Д02, Д07 (до 56,4 г/кг). Минимальное содержание Fe зафиксировано в точке Д08 (26,2 г/кг), максимальное для Д015 (44,2 г/кг). Концентрация Na изменяется в диапазоне от 13,5 до 21,3 г/кг, не проявляя каких-либо закономерностей.

Таким образом, в донных отложениях р. Енисей на участке протяженностью более 100 км в районе г. Красноярска определено содержание 24 элементов. Максимальные концентрации (13,5...56,4 г/кг)

характерны для макроэлементов Na, Ca, Fe, что соответствует их высокому содержанию в глинистых и песчаных породах [22]. Ba и Sr присутствуют в количестве 169...546 мг/кг, что на порядок выше содержания остальных микроэлементов. Распределение тяжёлых металлов имеет неоднородный характер, когда в близлежащих точках значения могут отличаться в несколько раз, что не дает в полной мере оценить влияние деятельности промышленных предприятий. Концентрации Cd и Ni в некоторых точках могут превышать пороговые значения, выше которых для биоты могут проявляться негативные эффекты. Отмечены более высокие концентрации U, Th, Ce, Cs вблизи населенных пунктов с. Атаманово и с. Б. Балчуг, чем выше по течению. Для исследованных металлов критических превышений, аномалий или явных закономерностей влияния промышленных предприятий региона на элементный состав донных отложений не выявлено.

Авторы выражают благодарность сотрудникам аналитической лаборатории ИБФ СО РАН, с.н.с. лаборатории радиоэкологии ИБФ СО РАН Т.А. Зотиной и профессору ФГАОУ ВО НИ ТПУ Л.П. Рихванову за помощь в проведении аналитических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка антропогенного загрязнения р. Енисей по содержанию металлов в основных компонентах экосистемы на участках, расположенных выше и ниже г. Красноярска О.В. Анищенко, М.И. Гладышев, Е.С. Кравчук, Г.С. Калачёва, И.В. Грибовская // Журнал СФУ. Биология. – 2010. – Т. 3. – № 1. – С. 82–98.
2. Кузина Г.Ш., Янтурин С.И. Исследование загрязнения тяжёлыми металлами донных отложений верхнего течения р. Урал // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6. – С. 582–584.
3. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Солдатова Е.А. Подвижность химических элементов в системе вода – донные отложения // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 45–51.
4. Формы нахождения микроэлементов в донных отложениях Ивановского водохранилища / О.А. Липатникова, Д.В. Гричук, И.Л. Григорьева, А.И. Хасанова, Т.В. Шестакова, А.Ю. Бычков, С.М. Ильина, В.В. Пухов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2014. – № 1. – С. 37–48.
5. Чухлебова Л.М., Бердников Н.В. Особенности накопления тяжёлых металлов в воде, донных отложениях и мышцах рыб среднего течения р. Амур // Региональные проблемы. – 2011. – Т. 14. – № 1. – С. 54–58.
6. Микроэлементы и тяжёлые металлы в воде и донных отложениях коллекторно-дренажной сети Дагестана / Ш.К. Салихов, Р.Р. Баширов, А.З. Магомедалиев, К.Б. Гимбатова, Ж.О. Шайхалова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 95. – С. 742–767. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/01/pdf/48.pdf> (дата обращения: 20.11.2014).
7. Темерев С.В. Оценка экологического состояния речных систем (Западная Сибирь, Средняя Обь) // Изв. Алт. гос. ун-та. – 2005. – № 3. – С. 45–49.
8. Гапеева М.В. Тяжёлые металлы в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Вода: химия и экология. – 2013. – № 5. – С. 3–7.
9. Бикташева Ф.Х., Латыпова Г.Ф. Загрязнение тяжёлыми металлами поверхностной воды и донных отложений озера Асылкуль республики Башкортостан // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 2. – С. 170–172.
10. Bogush A.A., Lazareva E.V. Behavior of heavy metals in sulfide mine tailings and bottom sediment (Salair, Kemerovo region, Russia) // Environmental Earth Sciences. – 2011. – V. 64. – Iss. 5. – P. 1293–1302.
11. Радиологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* / А.Я. Болсуновский, Е.Н. Муратова, А.Г. Суковатый, А.В. Пименов, Е.А. Санжараева, Т.А. Зотина, Т.С. Седельникова, Е.В. Паньков, М.Г. Корнилова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47. – № 1. – С. 63–73.
12. Зубарев В.А. Анализ тяжёлых металлов донных отложений малых рек, подверженных влиянию сельскохозяйственной мелиорации, на территории Среднеамурской низменности // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 203–208.
13. Савичев О.Г., Базанов В.А. Химический состав донных отложений реки Васюган и ее притоков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 37–41.
14. Burton G.A., Jr. Sediment quality criteria in use around the world // Limnology. – 2002. – V. 3. – Iss. 2. – P. 65–76.
15. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. – 2000. – V. 39. – Iss. 1. – P. 20–31.
16. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river / K.M. Mohiuddin, H.M. Zakir, K. Otomo, S. Sharmin, N. Shikazono // International Journal of Environmental Science & Technology. – 2010. – V. 7. – Iss. 1. – P. 17–28.
17. Multivariate Statistical Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals Monitored in Surface Sediment of the Luan River and its Tributaries, China / Z.-M. Wang, L.-D. Chen, H.-P. Zhang, R.-H. Sun // Human and Ecological Risk Assessment. – 2014. – V. 20. – Iss. 6. – P. 1521–1537.
18. Distribution of trace elements in waters and sediments of the Seversky Donets transboundary watershed (Kharkiv region, Eastern Ukraine) / Y. Vystavna, F. Huneau, J. Schfer, M. Motelica-Heino, G. Blanc, A. Larrose, Y. Vergeles, D. Diadin, P. Le Coustumer // Applied Geochemistry. – 2012. – V. 27. – Iss. 10. – P. 2077–2087.
19. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors / J. Fu, C. Zhao, Y. Luo, C. Liu, G.Z. Kyzas, Y. Luo, D. Zhao, Sh. An, H. Zhu // Journal of hazardous materials. – 2014. – V. 270. – P. 102–109.
20. Natural heavy metal and metalloid concentrations in sediments of the Minho River estuary (Portugal): baseline values for environmental studies / M. Mil-Homens, A.M Costa., S. Fonseca, M.A. Trancoso, C. Lopes, R. Serrano, R. Sousa // Environmental monitoring and assessment. – 2013. – V. 185. – Iss. 7. – P. 5937–5950.
21. Нормы и критерии оценки загрязнённости донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга: региональный норматив. – СПб.: Ленморниипроект, 1996. – 17 с.
22. Григорьев Н.А. О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры // Литосфера. – 2002. – № 1. – С. 61–71.

Поступила 27.11.2014 г.

UDC 550.422(571.51+282.256.3)

CONCENTRATIONS OF HEAVY METALS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER NEAR KRASNOYARSK

Dmitry V. Dementyev,

Cand. Sc., Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.
E-mail: dementyev@gmail.com

Aleksander Ya. Bolsunovsky,

Cand. Sc., Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: radecol@ibp.ru

Roman V. Borisov,

Cand. Sc., Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia; Institute of Chemistry
and Chemical Technology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
50/24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.
E-mail: roma_boris@list.ru

Elena A. Trofimova,

Institute of Biophysics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 50/50,
Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia.
E-mail: e.trofimova11@yandex.ru

The relevance of the study is determined by the necessity to obtain information on concentrations of chemical elements in sediments of the Yenisei River under impacts of continuous human activity.

The aim of the study is to assess the level of human-caused heavy metal pollution of the Yenisei River bottom sediments near Krasnoyarsk.

Methods used in the study. Metal concentrations (Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd) were measured with an AAS Kvant 2A atomic absorption spectrophotometer in the Analytical Laboratory of IBP SB RAS. Concentrations of Ca, Fe, Na, Sr, U, Th, Rb, Cs, Eu, La, Sb, Co, Sm, Ce, Ba, Nd, Sc, As, Zn were measured using instrumental neutron activation analysis in the research reactor in National Research Tomsk Polytechnic University.

Results. The authors have determined concentrations of 24 chemical elements in bottom sediments over 100 km of the Yenisei River near Krasnoyarsk. The distribution of heavy metals is non-uniform: concentrations of chemical elements in adjacent parts of sediments could differ by several times. In some regions Cd and Ni concentrations were higher than the threshold levels, above which adverse effects might occur. Zn, Cu, Cr, and Pb concentrations in bottom sediments of the Yenisei River fall within the range of average concentrations of these metals in other Russian river systems. Concentrations of U, Th, Ce, and Cs increased downstream of Krasnoyarsk. The study did not detect any critical or abnormally high concentrations of the metals measured; no definite effects of industrial pollution on the chemical composition of bottom sediments were either revealed.

Key words:

Bottom sediments, heavy metals, lanthanides, actinides, screening, the Yenisei River.

The authors give thanks to the scientists of analytical laboratory of IB SB RAS, T.A. Zotina senior scientist of radioecology of IB SB RAS and professor L.P. Rikhvanov (National Research Tomsk Polytechnic University) for assistance in analytical study.

REFERENCES

1. Anishchenko O.V., Gladyshev M.I., Kravchuk E.S., Kalacheva G.S., Gribovskaya I.V. Otsenka antropogennogo zagryazneniya r. Enisey po sodержaniyu metallov v osnovnykh komponentakh ekosistemy na uchastkakh, raspolozhennykh vyshe i nizhe g. Krasnoyarska [Assessment of the Yenisei River Anthropogenic Pollution by Metals Concentrations in the Main Ecosystem Compartments Upstream and Downstream Krasnoyarsk]. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 82–98.
2. Kuzhina G.Sh., Yanturin S.I. Issledovanie zagryazneniya tyazhelyimi metallami donnykh otlozheniy verhnego techeniya r. Ural [Investigation of heavy metal contamination of sediments of the upper reaches of the river Ural]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 6, pp. 582–584.
3. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Soldatova E.A. Podvizhnost khimicheskikh elementov v sisteme voda – donnye otlozheniya [The mobility of chemical elements in the water–sediment system]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 45–51.
4. Lipatnikova O.A., Grichuk D.V., Grigoreva I.L., Khasanova A.I., Shestakova T.V., Bychkov A.Yu., Ilina S.M., Pukhov V.V. Formy nakhozhdeniya mikroelementov v donnykh otlozheniyakh Ivankovskogo vodokhranilishcha [Forms of occurrence of trace elements in sediments of the reservoir Ivankovskoye]. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, 2014, no. 1, pp. 37–48.

5. Chukhlebova L.M., Berdnikov N.V. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov v vode, donnykh otlozheniyakh i myshtsakh ryb srednego techeniya r. Amur [Features of heavy metals accumulation in water, sediment and fish muscle in middle reaches of Amur]. *Regionalnye problemy*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 54–58.
6. Salikhov Sh.K., Bashirov R.R., Magomedaliyev A.Z., Gimbatova K.B., Shaykhalova Zh.O. Mikroelementy i tyazhelye metally v vode i donnykh otlozheniyakh kollektorno-drenazhnoy seti Dagestana [Trace elements and heavy metals in water and sediments of drainage network in Dagestan]. *Politematicheskii setevoy elektronny nauchny zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, vol. 95, pp. 742–767. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/01/pdf/48.pdf> (accessed 20 November 2014).
7. Temerev S.V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rechnykh sistem (Zapadnaya Sibir, Srednyaya Ob) [Estimation of ecological situation of river systems (Western Siberia, Central Ob)]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2005, no. 3, pp. 45–49.
8. Gapeeva M.V. Tyazhelye metally v vode i donnykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilishcha [Heavy metals in water and sediments of the Rybinsk Reservoir]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 5, pp. 3–7.
9. Biktasheva F.Kh., Latypova G.F. Zagryaznenie tyazhelymi metallami poverkhnostnoy vody i donnykh otlozheniy ozera Asylykul respubliki Bashkortostan [The pollution with heavy metals the surface of water and sediments in Lake Asylykul, Republic of Bashkortostan]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 2, pp. 170–172.
10. Bogush A.A., Lazareva E.V. Behavior of heavy metals in sulfide mine tailings and bottom sediment (Salair, Kemerovo region, Russia). *Environmental Earth Sciences*, 2011, vol. 64, Iss. 5, pp. 1293–1302.
11. Bolsunovskiy A.Ya., Muratova E.N., Sukovaty A.G., Pimenov A.V. Radiologicheskii monitoring reki Enisey i tsitogeneticheskie kharakteristiki vodnogo rasteniya Elodea Canadensis [Radiological monitoring of the Yenisei River and cytogenetic characteristics of aquatic plant of Elodea Canadensis]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2007, vol. 47, no. 1, pp. 63–73.
12. Zubarev V.A. Analiz tyazhelykh metallov donnykh otlozheniy malykh rek, podverzhennykh vliyaniyu selskohozyaystvennoy melioratsii, na territorii Sredneamurskoy nizmennosti [Analysis of heavy metal sediments of small rivers exposed to agricultural reclamation in the territory of the Sredneamurskaya lowlands]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 203–208.
13. Savichev O.G., Bazanov V.A. Khimicheskiy sostav donnykh otlozheniy reki Vasyugan i ee pritokov [The chemical composition of bottom sediments of the river Vasyugan and its tributaries]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 3, pp. 37–41.
14. Burton Jr. G.A. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*, 2002, vol. 3, Iss. 2, pp. 65–76.
15. MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, vol. 39, Iss. 1, pp. 20–31.
16. Mohiuddin K.M., Zakir H.M., Otomo K., Sharmin S., Shikazono N. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 7, Iss. 1, pp. 17–28.
17. Wang Z.-M., Chen L.-D., Zhang H.-P., Sun R.-H. Multivariate Statistical Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals Monitored in Surface Sediment of the Luan River and its Tributaries, China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2014, vol. 20, Iss. 6, pp. 1521–1537.
18. Vystavna Y., Huneau F., Schäfer J., Motelica-Heino M., Blanc G., Larrose A., Vergeles Y., Diadin D., Le Coustumer P. Distribution of trace elements in waters and sediments of the Sever-sky Donets transboundary watershed (Kharkiv region, Eastern Ukraine). *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27, Iss. 10, pp. 2077–2087.
19. Fu J., Zhao, C., Luo, Y., Liu, C., Kyzas G.Z., Luo Y., Zhao D., An Sh., Zhu H. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors. *Journal of hazardous materials*, 2014, vol. 270, pp. 102–109.
20. Mil-Homens M., Costa A.M., Fonseca S., Trancoso M.A., Lopes C., Serrano R., Sousa R. Natural heavy metal and metalloid concentrations in sediments of the Minho River estuary (Portugal): baseline values for environmental studies. *Environmental monitoring and assessment*, 2013, vol. 185, Iss. 7, pp. 5937–5950.
21. *Normy i kriterii otsenki zagryaznennosti donnykh otlozheniy v vodnykh obektakh Sankt-Peterburga: regionalny normativy* [Norms and criteria of assessing bottom sediments contamination in water objects of Saint-Petersburg: regional norms]. St-Petersburg, Lenmorniiproekt Publ., 1996. 17 p.
22. Grigorev N.A. O klarkovom soderzhanii khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory [About clark content of chemical elements in the upper continental crust]. *Lithosphere*, 2002, no. 1, pp. 61–71.

Received: 27 November 2014.

УДК 661.152.2

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛЕОНИТА ИЗ СУЛЬФАТНЫХ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ ЩЕЛОКОВ

Стефанцова Ольга Геннадьевна,

аспирант каф. химических технологий Пермского национального
исследовательского политехнического университета, Россия, 614990,
г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: Olgatnv07@rambler.ru

Рупчева Вера Александровна,

канд. техн. наук, доцент каф. химических технологий Пермского
национального исследовательского политехнического университета,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. E-mail: Poilov@pstu.ru

Пойлов Владимир Зотович,

д-р техн. наук, профессор, заведующий каф. химических технологий
Пермского национального исследовательского политехнического университета,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр. 29. E-mail: Poilov@pstu.ru

Актуальность работы заключается в возможности использования леонита, получаемого в результате кристаллизации из сульфатного щелока, в качестве комплексного калийно-магниевого сульфатного удобрения. Производство такого вида удобрений является перспективным направлением в развитии калийной промышленности. Главным преимуществом сульфатных удобрений является возможность использования их для растений, не переносящих избытка хлора, на различных почвах и большого числа культур.

Цель работы: исследование стадии кристаллизации в технологии получения леонита из полигалитовой руды, выбор необходимого режима кристаллизации.

Методы исследования: моделирование технологического процесса в лабораторных условиях; определение размеров, количества и формы кристаллов, образованных в различные интервалы времени, с использованием системы непрерывной видеорегистрации частиц суспензии «PVM Lasentec V819»; рентгенофазовый анализ продукта, полученного при различных условиях.

Результаты. Проведены исследования изотермической и политермической кристаллизации леонита и сингенита из сульфатных калийно-магневых щелоков. Показано, что при изотермическом режиме кристаллизуется смесь сингенита и леонита, а при политермическом – чистый леонит. По мере протекания политермической кристаллизации наблюдается трансформация формы кристаллов леонита из шаровидной в таблитчатую, а затем в игольчатую. При достижении кристаллами размеров 50 мкм происходит их механическое истирание, и их размеры уменьшаются, это связано также с перекристаллизацией шаровидных кристаллов в таблитчатые. При увеличении длительности процесса до 90 минут и выше формируются кристаллы леонита игольчатой формы, при этом наблюдается интенсивный рост размеров кристаллов.

Выводы. Установлено, что в сложной системе K_2SO_4 – $MgSO_4$ – $CaSO_4$ наиболее целесообразно проводить политермическую кристаллизацию, которая позволяет получить чистый, пригодный к дальнейшему использованию продукт – леонит. При управлении параметрами политермической кристаллизации существует возможность получить кристаллы заданного размера и формы. При необходимости образования шаровидных кристаллов длительность процесса не должна превышать 45 минут (температура щелока при этом 68 °С). Таблитчатые кристаллы можно получить путем охлаждения щелока до температуры 45 °С. Если длительность процесса составит более 90 минут (при температуре щелока ниже 45 °С), то происходит формирование кристаллов игольчатой формы.

Ключевые слова:

Полигалитовая руда, сульфатные калийно-магневые удобрения, кристаллизация, леонит, сингенит.

В развитии калийной промышленности перспективным направлением является производство бесхлорных комплексных сульфатных удобрений. К таким удобрениям относят: сульфат калия, калимагнезию и калийно-магнелийный концентрат [1]. Главным преимуществом сульфатных удобрений является возможность их использования для растений, не переносящих избытка хлора. Кроме того, накопление в почве хлорид-ионов снижает урожайность и повышает уровень солености почвы [2].

Известные способы получения сульфатных удобрений можно условно разделить на две группы. К первой группе относят методы, в которых в качестве калийсодержащего сырья используют хлорид калия, на который воздействуют серной

кислотой, сульфатом натрия либо сульфатом аммония и в результате ряда химических реакций получают сульфат калия [3–8]. Ко второй группе относят методы получения сульфатных удобрений переработкой природного полиминерального сырья. В качестве природного сырья используют полигалитовые ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и лангбейнитовые ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$) породы [9–11].

Известные технологии получения сульфатных калийно-магневых удобрений из полигалитовой руды включают стадии: обогащения руды, прокаливания, выщелачивания и кристаллизации [12]. На стадии обогащения происходит удаление из полигалитовой руды хлорида натрия. Для этого используют гравитационные методы обогащения, ко-

торые основаны на разделении частиц в тяжелой жидкости на фракции [13]. Также изучены способы отмывки полигалитовой руды от хлорида натрия водой [14]. Для повышения эффективности процесса выщелачивания после обогащения полигалитовую руду прокаливают при температуре 450–550 °С. При этом полигалит разлагается с образованием твердого раствора, содержащего калий-дикальций сульфат ($K_2SO_4 \cdot 2CaSO_4$), лангбейнит ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$) и ангидрит ($CaSO_4$). Прокаленную полигалитовую руду выщелачивают водой или сульфатным калийно-магниевым щелоком [15].

Существуют методы горячего и холодного выщелачивания. В некоторых технологиях комбинируют эти методы. В известных технологиях после выщелачивания проводят кристаллизацию шенита ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$). Шенит – минерал белого или серого цвета, хорошо растворим в воде, поэтому может использоваться в качестве готового удобрения. В некоторых технологиях после кристаллизации шенит подвергают разложению водой с получением сульфата калия [16].

Экспериментальная часть

В данной работе была исследована полигалитовая руда Жилинского месторождения. Такая руда содержит (%): галита 5–27, нерастворимого остатка 0,1–5,5, KCl 0,4, H_2O 0,1, остальное – полигалит $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$ [17]. Минерал полигалит содержит в своем составе 28,91 % K_2SO_4 и 19,97 % $MgSO_4$, которые могут быть извлечены путем растворения с последующей кристаллизацией и использованы, как удобрения [18]. Различают изотермическую и политермическую кристаллизацию. Изотермическую кристаллизацию проводят путем частичного удаления растворителя, что осуществляют, как правило, при выпаривании раствора. Удаление части растворителя приводит к созданию необходимого пересыщения. Политермическую (изогидрическую) кристаллизацию проводят путем уменьшения температуры. При охлаждении горячих растворов возникает пересыщение, обуславливающее выделение кристаллов продукта [19, 20].

Выбор метода кристаллизации зависит от характера изменения растворимости вещества в зависимости от температуры. Растворимость солей калия и магния в воде увеличивается с ростом температуры, а растворимость малорастворимого сульфата кальция практически не изменяется. Сульфат кальция может образовывать двойные сульфаты типа сингенита $K_2SO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot H_2O$, который лучше растворим в воде. По этой причине в образующемся после выщелачивания сульфатном щелоке сульфат кальция присутствует в форме сингенита. Также в полученном сульфатном щелоке могут присутствовать различные двойные сульфаты калия и магния, такие как шенит ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$), леонит ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$), калиймагнезия ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$). Кроме того, присутствующие в растворе соли могут высаливать друг

друга. Поэтому невозможно однозначно предположить, как будет проходить кристаллизация в сложной системе K_2SO_4 – $MgSO_4$ – $CaSO_4$. Параметры кристаллизации в этой системе можно установить только экспериментальным путем. Поэтому целью данной работы являлось исследование стадии кристаллизации в технологии сульфатных калийно-магниевых удобрений, выбор метода и режима кристаллизации, обеспечивающих получение леонита без примесей сингенита с заданными размерами и формой кристаллов. В качестве объекта исследования использовали сульфатный щелок, полученный при выщелачивании полигалитовой руды, содержащий соли калия, магния и кальция.

При проведении эксперимента полигалитовую руду предварительно обогащали путем отмывки хлорида натрия холодной водой, прокаливали при температуре 550 °С, а затем выщелачивали при температуре 60 °С. При выщелачивании руды образуется нерастворимый осадок, который состоит в основном из сульфата кальция и его кристаллогидратов, и насыщенный сульфатный щелок, который впоследствии кристаллизовали. Масса полученного щелока после выщелачивания составила 630 г. Концентрация сульфатов калия, магния и кальция в щелоке после выщелачивания представлена в табл. 1. Содержание ионов калия и кальция определяли пламенно-фотометрическим методом, сульфат-ионов – весовым методом, а ионов магния – комплексонометрическим титрованием.

Таблица 1. Концентрация сульфатов калия, магния и кальция в насыщенном сульфатном щелоке, используемом для кристаллизации

Table 1. Concentration of potassium, magnesium and calcium sulphates in saturated sulphate liquor used for crystallization

Наименование компонента Component	K_2SO_4	$MgSO_4$	$CaSO_4$
Концентрация, % Concentration, %	11,6	22,3	3,5

При изотермической кристаллизации исходный сульфатный щелок в течение часа выпаривали при температуре кипения сульфатного раствора, которая была установлена экспериментально и составила 105 °С. Выпаривание раствора проводили при атмосферном давлении и механическом перемешивании. Во время проведения процесса испарилось 180 г воды. Политермическую кристаллизацию проводили в реакторе при постоянной скорости охлаждения 2 °С в минуту в течение 120 минут при перемешивании механической мешалкой со скоростью 600 об/мин. Исходный сульфатный щелок, имеющий температуру 90 °С, охлаждали до температуры 30 °С. Полученную после кристаллизации суспензию фильтровали на вакуум-фильтре. Кристаллизат сушили при температуре 120 °С до постоянного веса и анализировали на дифрактометре марки «SHIMADZU XRD-7000». Политермическая кристаллизация была также ис-

следована с использованием системы непрерывной видеорегистрации частиц суспензии «PVM Lasentec V819», с помощью которой были определены размеры, форма и количество образующихся кристаллов.

Результаты и обсуждение

При проведении изотермической кристаллизации появление первых кристаллов наблюдали через 20 минут после начала процесса выпаривания. На основании расчета скорости испарения растворителя, которая составила 3 г/мин, можно заключить, что за 20 минут выпаривания испарилось 60 г воды, что составило 9,52 мас. % от начальной массы раствора. При этом концентрация сульфатов калия, магния и кальция в пересыщенном растворе при изотермической кристаллизации возросла (табл. 2).

Таким образом, процесс изотермической кристаллизации исходного раствора (состав в табл. 1) при температуре выпаривания 105 °С начинается только при упаривании 9,52 мас. % воды от на-

чальной массы раствора и достижении состава, отраженного в табл. 2. Фазовый состав образующегося при этом осадка приведен на рентгенограмме (рис. 1).

Таблица 2. Концентрация сульфатов калия, магния и кальция в пересыщенном растворе при изотермической кристаллизации

Table 2. Concentration of potassium, magnesium and calcium sulphates in oversaturated solution at isothermal crystallization

Наименование компонента Component	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄
Концентрация, % Concentration, %	12,8	24,6	3,9

Из данных рентгенограммы на рис. 1 можно заключить, что при изотермической кристаллизации первоначально в твердую фазу выделяется сингенит ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$), растворимость которого, как известно, практически не изменяется с повышением температуры. При последующем ох-

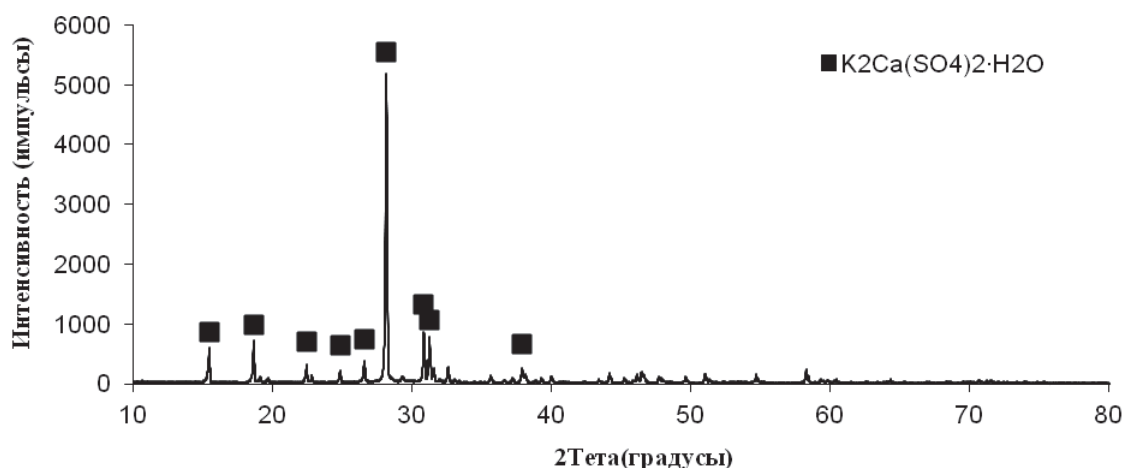


Рис. 1. Рентгенограмма первых кристаллов, полученных при изотермической кристаллизации

Fig. 1. X-ray pattern of the first crystals obtained at isothermal crystallization

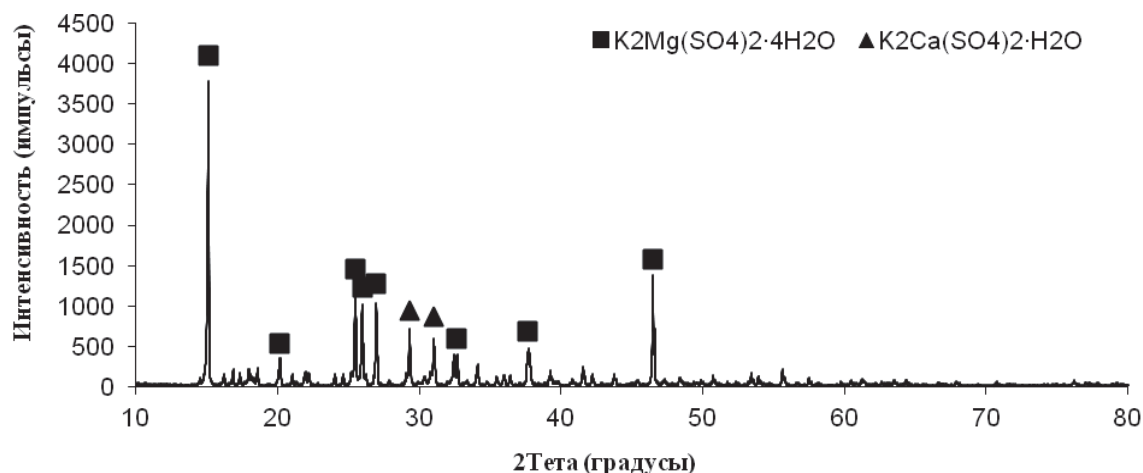


Рис. 2. Рентгенограмма конечного продукта, полученного при изотермической кристаллизации

Fig. 2. X-ray pattern of the final product obtained at isothermal crystallization

лаждении полученной суспензии второй кристаллической фазой, выпадающей в осадок, является леонит ($K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$), что подтверждает рентгенограмма на рис. 2. Можно видеть, что конечный продукт, получаемый при изотермической кристаллизации, представляет собой смесь кристаллов леонита и сингенита.

Леонит, представляющий собой смесь сульфатов калия и магния, может быть использован в качестве готового калийно-магниевого удобрения или может быть переработан на чистый сульфат калия. Присутствие в твердой фазе сингенита является нежелательным, поскольку данное вещество, из-за низкой растворимости в воде, будет выполнять роль балласта и при этом связывать часть калия – основного полезного компонента в удобрении. В известных на сегодняшний день технологиях полигалитовую руду перерабатывают с получением шенита ($K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) [21]. Леонит,

также как и шенит, хорошо растворим в воде, также может разлагаться водой с образованием сульфата калия, но в отличие от шенита он содержит в своем составе меньшее количество связанной воды, что дает преимущества при его переработке и при использовании в качестве готового удобрения.

Рентгенофазовый анализ продукта, полученного при политермической кристаллизации, показал, что образуется чистый леонит ($K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$) без примесей сингенита ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$) (рис. 3). Таким образом, кристаллизация леонита путем охлаждения сульфатного щелока по сравнению с изотермической кристаллизацией является более предпочтительным процессом для тройной системы K_2SO_4 – $MgSO_4$ – $CaSO_4$. Еще одним преимуществом политермической кристаллизации является возможность управления размерами кристаллов путем регулирования скорости охлаждения сульфатного щелока.

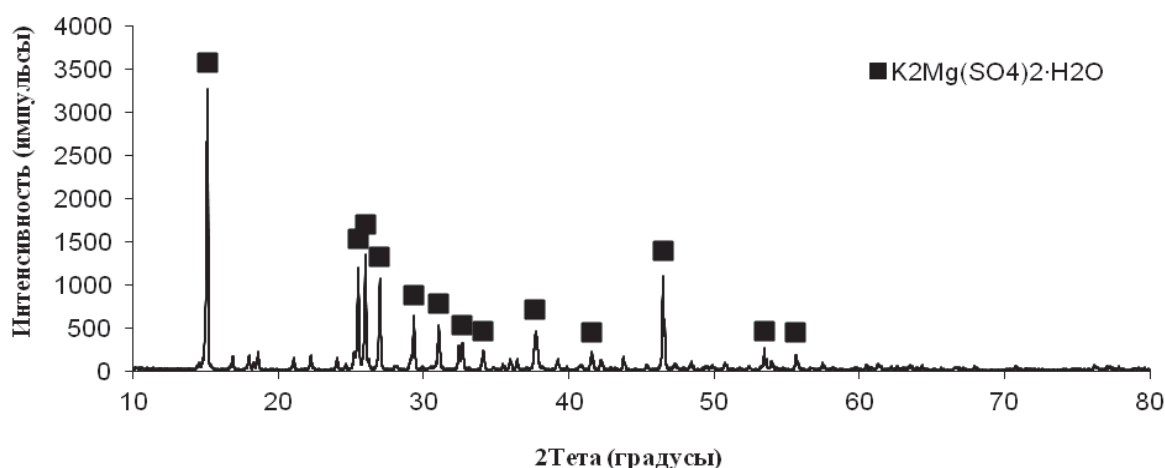


Рис. 3. Рентгенограмма продукта, полученного при политермической кристаллизации

Fig. 3. X-ray pattern of the product obtained at polythermal crystallization

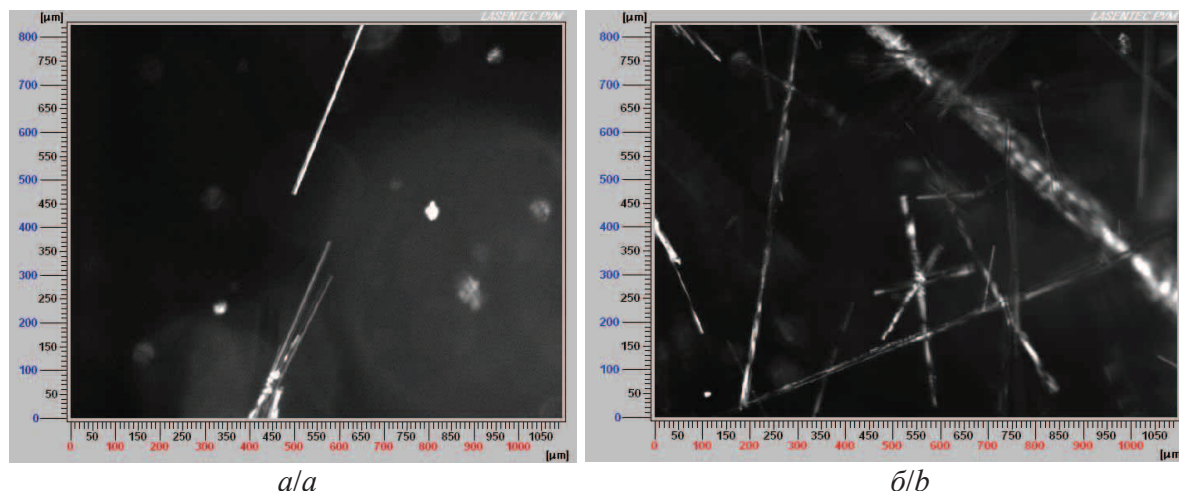


Рис. 4. Изображения кристаллов леонита после 90 минут (а) и 120 (б) от начала кристаллизации, полученные с использованием системы «PVM Lasentec V819»

Fig. 4. Leonite crystal images in 90 min (a) and 120 (b) after beginning of crystallization obtained while using the system «PVM Lasentec V819»

Исследование политермической кристаллизации с использованием системы непрерывной видеорегистрации «PVM Lasentec V819» позволяет заключить, что появление первых зародышей твердой фазы было обнаружено при температуре 75 °С (по истечении 30 минут от начала кристаллизации). Кристаллизация леонита начинается с образования мелких шаровидных кристаллов. В течение последующих 45 минут кристаллизации в области температур 68–45 °С происходит рост таблитчатых кристаллов. При дальнейшем снижении температуры ниже 45 °С происходит образование игольчатых кристаллов леонита, что можно наблюдать на рис. 4, а. При дальнейшей кристаллизации в течение часа форма кристаллов не изменяется (рис. 4, б), наблюдается рост игольчатых кристаллов.

Обработка полученных изображений позволила установить изменения размеров и количества кристаллов в зависимости от времени протекания процесса. Графики зависимости размеров и количества кристаллов от длительности протекания процесса кристаллизации в диапазоне от 90 до 30 °С со скоростью охлаждения 2 °С/мин представлены, соответственно, на рис. 5, 6.

Из графика на рис. 5 видно, что при достижении шаровидными кристаллами размера 50 мкм при дальнейшей кристаллизации происходит их незначительное уменьшение. Можно предположить, что это происходит за счет механического разрушения кристаллов при перемешивании при малой скорости охлаждения. В это время образуются кристаллы таблитчатой формы. Увеличение размеров кристаллов при длительности процесса

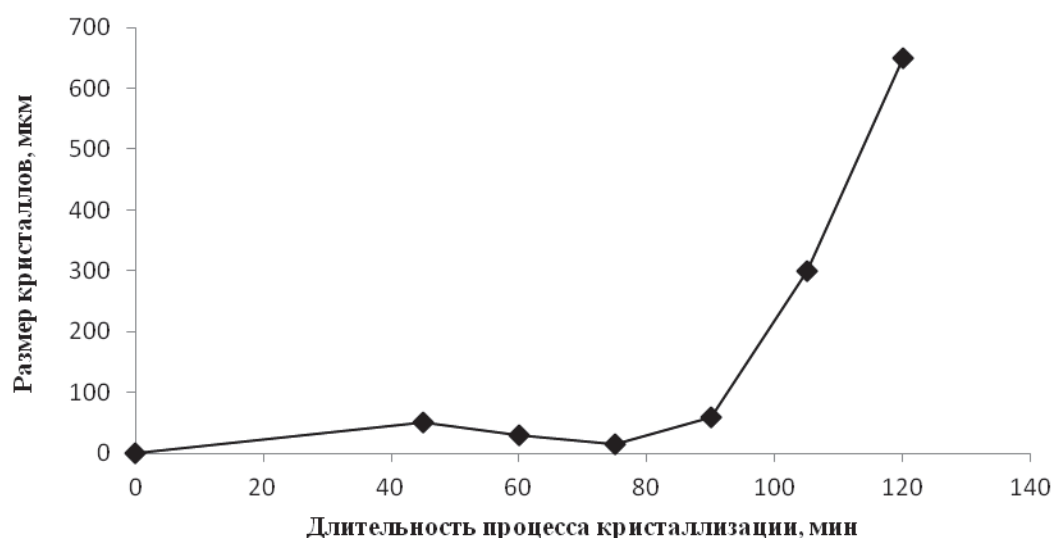


Рис. 5. Зависимость размера кристаллов леонита от длительности кристаллизации

Fig. 5. Dependence of leonite crystal size on crystallization duration

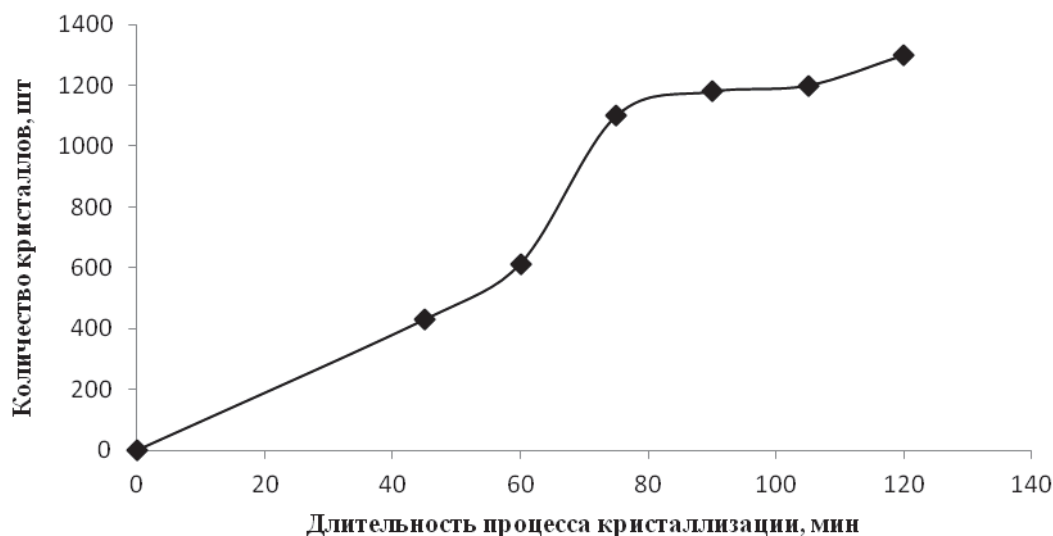


Рис. 6. Зависимость количества кристаллов леонита от длительности кристаллизации

Fig. 6. Dependence of leonite crystal quantity on crystallization duration

более 90 минут вызвано формированием игольчатых кристаллов. Трансформация кристаллов леонита из шаровидной в таблитчатую, а затем в игольчатую форму, по-видимому, связана с эффектом перекристаллизации. Конечной и более устойчивой формой образующихся кристаллов в исследованных условиях является игольчатая форма, получаемая при длительности процесса более 90 минут и температурах кристаллизации ниже 45 °С. При этом кристаллы игольчатой формы имеют длину до 700 мкм. Таким образом, регулируя интенсивность перемешивания и конечную температуру политермической кристаллизации, можно изменять форму и размер кристаллов леонита.

При данных условиях проведения кристаллизации интенсивный рост числа кристаллов наблюдается во временном интервале от 45 до 80 минут от начала кристаллизации (рис. 6). По истечении 80 минут от начала кристаллизации число кристаллов изменяется незначительно, а размер получаемых кристаллов увеличивается в несколько раз (рис. 5).

Выводы

1. Исследован процесс изотермической и политермической кристаллизации из сульфатных калийно-магниевых щелоков, полученных путем выщелачивания полигалитовой руды. Установлено, что в изотермическом режиме выпаривания при 105 °С образуется смесь сингенита и леонита. Сингенит служит балластом в готовом удобрении и связывает часть основного полезного компонента – калия, что является нежелательным процессом.
2. Изучена политермическая кристаллизация леонита путем охлаждения сульфатных калийно-

магниевых щелоков в области температур 90–30 °С. Выявлено, что при этом образуется леонит, который может быть использован в качестве готового калийно-магниевого удобрения, и может быть также переработан на чистый сульфат калия.

3. Обнаружено, что первые зародыши кристаллов леонита образуются через 30 минут после начала кристаллизации (при температуре щелока 75 °С). На начальном этапе происходит формирование кристаллов шаровидной формы, затем в температурном интервале охлаждения 68–45 °С происходит рост таблитчатых кристаллов, при дальнейшем снижении температуры ниже 45 °С образуются кристаллы игольчатой формы. При достижении кристаллами размеров 50 мкм происходит их механическое истирание, и размеры кристаллов уменьшаются, в это время происходит формирование таблитчатых кристаллов. Последующее увеличение размеров кристаллов при увеличении длительности процесса более 90 минут можно объяснить ростом игольчатых кристаллов.
4. При исследованных условиях кристаллизации (скорость перемешивания 600 об/мин, скорость охлаждения 2 °С в минуту) образование зародышей кристаллизации происходит во временном интервале до 30 минут от начала процесса кристаллизации. Увеличение числа образующихся кристаллов продолжается до 80 минут от начала кристаллизации. При дальнейшем увеличении длительности процесса выше 80 минут количество кристаллов изменяется незначительно, зато наблюдается интенсивный рост размеров кристаллов. В это время формируются кристаллы леонита игольчатой формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишняков А.К., Шакирзянова Д.Р., Габдрахманова В.И. Полигалитовые породы – новое сырье для производства дефицитных сульфатных калийно-магниевых удобрений // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 29–33.
2. Хузиахметов Р.Х., Ахметов Т.Г., Хуснутдинов В.А. Технология бесхлоридных комплексных удобрений и оценка их агрохимической эффективности // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 3. – С. 21–31.
3. Банных Н.С. Получение сульфата калия из хлористого калия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1951. – 25 с.
4. Томасзевска М. Предварительное исследование конверсии хлорида калия в сульфат калия, используя мембранный реактор // Журнал мембранной науки. – 2008. – № 5. – С. 14–18.
5. Химический процесс получения хлоровада и бесхлоридных комплексных калийных сульфатных удобрений или сульфатов других металлов: пат. США № 887776; заявл. 13.09.2010; опубл. 02.08.2011.
6. Способ конверсии хлорида металла в его сульфат: пат. Рос. Федерация № 2489502; заявл. 29.05.2012; опубл. 10.08.2013. – Бюл. № 4. – 8 с.
7. Метод получения сульфата калия из хлорида калия: пат. США № 8409542; заявл. 14.06.2011; опубл. 02.04.2013.
8. Процесс получения сульфата калия и хлороводородной кислоты: пат. Япония № 2040109; заявл. 09.04.1991; опубл. 11.10.1991.
9. Шакирзянова Д.Р. Переработка полигалитсодержащих пород на комплексные бесхлоридные удобрения (на примере Шарлыкского проявления); автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2009. – 20 с.
10. Кислотное разложение трудно-растворимых калийных руд с использованием органических растворителей / В.Т. Яворский, К.И. Блаживский, Т.В. Перекупко, И.Ю. Костив, И.Е. Максимович // Неорганический синтез и промышленная неорганическая химия. – 2009. – № 5. – С. 767–771.
11. Метод получения сульфата калия: пат. США № 6315976; заявл. 14.06.1999; опубл. 13.09.2001.
12. Грабовенко В.А. Производство бесхлорных калийных удобрений. – Л.: Химия, 1980. – 256 с.
13. Хуснутдинов В.А., Вишняков А.К. Отделение полигалитовой породы от галита // Химическая промышленность. – 2003. – № 10. – С. 24–26.
14. Исследование процессов отмывки и выщелачивания в производстве сульфатных калийных удобрений из полигалитовых руд / О.Г. Стефанцова, В.А. Рупчева, Е.Ю. Волкова, Е.Л. Рассудихина, В.З. Пойлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2013. – № 2. – С. 49–62.
15. Процесс для получения сульфатных калийных удобрений и сульфатов других металлов: пат. США № 6365122; заявл. 22.06.1998; опубл. 02.04.2002.

16. Мазунин С.А., Чечулин В.Л. Высаливание как физико-химическая основа малоотходных способов получения фосфатов калия и аммония. – Пермь: Пермский национальный исследовательский университет, 2012. – 114 с.
17. Справочник по переработке минеральных солей и рассолов / под ред. И.Д. Соколова. – Л.: Химия, 1985. – 452 с.
18. Лебеденко Ю.П. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. – Л.: Химия, 1973. – 48 с.
19. Ленников О.Д. Закономерности кристаллизации неорганических солей из водных растворов: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Екатеринбург, 2011. – 46 с.
20. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. – М: Химик, 1968. – 304 с.
21. Способ получения шенита: пат. 2373151 Рос. Федерация № 2007143342/15; заявл. 22.11.2007; опубл. 20.11.2009. – Бюл. № 18. – 11 с.

Поступила 16.12.2014 г.

UDC 661.152.2

STUDY OF LEONITE CRYSTALLIZATION FROM SULPHATE POTASSIUM-MAGNESIUM LIQUOR

Olga G. Stefantsova,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russia. E-mail: Olgatnv07@rambler.ru

Vera A. Rupcheva,

Cand. Sc., Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russia. E-mail: Poilov@pstu.ru

Vladimir Z. Poilov,

Dr. Sc., Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russia. E-mail: Poilov@pstu.ru

The relevance of the research consists in possibility of using leonite, obtained at crystallization from sulphate liquor, as a complex sulphate potassium-magnesium fertilizer. Production of such fertilizer is a promising direction in development of potassium industry. The main advantage of sulphate fertilizers is the possibility of using them for plants, which cannot endure the chlorine excess. In addition they can be used for different soils and large number of culture of plants.

The main aim of the research is to investigate the crystallization stage in leonite production from polyhalite ore, to select the required mode of crystallization.

The methods used in the study: modeling of technological process in laboratory conditions, determination of size, quantity and form of crystals, formed at different time intervals, by system of continuous video registration of suspension particles «PVM Lasentec V819», X-ray analysis of product, obtained at different conditions.

The results. The authors have carried out the investigations of isothermal and polythermal crystallization of leonite and syngenite from sulphate potassium-magnesium liquors. It is shown that the mixture of leonite and syngenite is crystallized in isothermal mode, and pure leonite is formed in polythermal mode. The leonite crystal form transforms from globular in tabulated, and then in acicular, at polythermal crystallization. The mechanical abrasion of crystal occurs at achievement of size of 50 microns, the crystal size decreases, it is also related with recrystallization of globular crystals into tabulated ones. The leonite crystal acquires acicular form at process duration of 90 minutes or longer, the intensive growth of crystal size occurs.

The findings. It was determined that it is advisable to carry out polythermal crystallization in complicated system K_2SO_4 – $MgSO_4$ – $CaSO_4$, it allows obtaining pure product – leonite, which is suitable for further use. There is a possibility to obtain crystal of the given size and form when controlling the parameters of polythermal crystallization. The process duration should not exceed 45 minutes (liquor temperature is 68 °C) if it is necessary to obtain globular crystal. The tabulated crystal can be prepared by liquor cooling to 45 °C. If process duration is more than 90 minutes (at liquor temperature below 45 °C), the acicular crystals are formed.

Key words:

Polyhalite ore, sulphate potassium-magnesium fertilizer, crystallization, leonite, syngenite.

REFERENCES

1. Vishnyakov A.K., Shakirzyanova D.R., Gabdrahmanova V.I. Poligalitovaya ruda – novoe syre dlya proizvodstva sulfatnykh kaliyno-magnievykh udobreniy [Polyhalite ore is new raw for producing sulphate potassium-magnesium fertilizer]. *Exploration and conservation of mineral resources*, 2007, no. 11, pp. 29–33.
2. Khuziakhmetov R.Kh., Akhmetov T.G., Khusnutdinov V.A. Tekhnologiya beskhlordidnykh kompleksnykh udobreniy i otsenka ikh agrokhimicheskoy effektivnosti [The technology of chloride-free complex fertilizers and estimation of their agrochemical efficiency]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i bio tekhnologiya*, 2009, no. 3, pp. 21–31.
3. Bannykh N.S. Poluchenie sulfata kaliya iz khlorigostogo kaliya. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Obtaining potassium sulfate from potassium chloride. Cand. Diss. Abstract]. Sverdlovsk, 1951. 25 p.
4. Tomaszewska M. Predvaritelnoe issledovanie konversii khlorida kaliya v sulfat kaliya, ispolzuya membranny reaktor [Preliminary

- ry studies on converting potassium chloride into potassium sulfate using membrane reactor]. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol. 317, no. 5, pp. 14–18.
5. Finkelshtein L. *Khimicheskiy protsess polucheniya khlorovodороda i beskhloridnykh kompleksnykh kaliynykh sulfatnykh udobreniy ili sulfatov drugikh metallov* [Chemical process to produce hydrogen chloride and chloride-free compound potassium sulfate fertilizers or other metal sulfates]. Patent US, no. 887776, 2011.
6. Kasikov A.G. *Sposob konversii khlorida metalla v ego sulfat* [The method of metal chloride conversion into its sulfate]. Patent RF, no. 2489502, 2013.
7. Lalancette J.-M., Lemieux D., Dubreuil B. *Metod polucheniya sulfata kaliya iz khlorida kaliya* [Method of producing potassium sulfate from potassium chloride]. Patent US, no. 8409542, 2013.
8. Khiguchi. *Protsess polucheniya sulfata kaliya i khlorovodorodnoy kisloty* [Process of producing potassium sulfate and hydrochloric acid]. Patent Japan, no. 2040109, 1991.
9. Shakirzyanova D.R. *Pererabotka poligalitsoderzhashchikh porod na kompleksnye beskhloridnye udobreniya. Aftoref. Dis. Kand. nauk* [Processing the polyhalite ores with the complex chlorate-free fertilizer production. Cand. Diss. Abstract]. Kazan, 2009. 20 p.
10. Yavorskiy V.T., Blazhivskiy K. I., Perekupko T.V., Kostiv I.Yu., Maksimovich I.E. *Kislotnoe razlozhenie trudnorastvorimykh kaliynykh rud s ispolzovaniem organicheskikh rastvoriteley* [Acid decomposition of difficultly soluble potassium ores with the use of organic solvents]. *Inorganic Synthesis and Industrial Inorganic Chemistry*, 2009, no. 5, pp. 767–771.
11. Phinney G., Robin V. *Metod polucheniya sulfata kaliya* [Method of producing potassium sulfate]. Patent US, no. 6315976, 2001.
12. Grabovenko V.A. *Proizvodstvo beskhloridnykh kaliynykh udobreniy* [Production of chlorate-free potassium fertilizer]. Leningrad, Khimiya Publ., 1980. 256 p.
13. Khusnutdinov V.A., Vishnyakov A.K. *Otdelenie poligalitovoy породы ot galita* [Separation of polyhalite ore from halite]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2003, no. 10, pp. 24–26.
14. Stefantsova O.G., Rupcheva V.A., Akhunova A.B., Poylov V.Z. *Issledovanie protsessov otmyvki i vyshchelachivaniya v tekhnologii polucheniya sulfatnykh kaliynykh udobreniy iz poligalitovykh rud* [Study of the washing and leaching processes in sulfate potassium fertilizer production from polygalite ores]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i bio tekhnologiya*, 2014, no. 1, pp. 75–83.
15. William J., Keith D., Timothy G. *Protsess polucheniya sulfatnogo kaliynogo udobreniya i sulfatov drugikh metallov* [Process for manufacturing potassium sulfate fertilizer and other metal sulfates]. Patent US, no. 6365122, 2002.
16. Mazunin S.A., Chechulin V.L. *Vysalivanie kak fiziko-khimicheskaya osnova malootkhodnykh sposobov polycheniya fosfatov kaliya i ammoniya* [Salting out as physico-chemical basis of low waste methods for producing potassium and ammonium phosphate]. Perm, Perm National Research University Press, 2012. 114 p.
17. Sokolov I.D. *Spravochnik po pererabotke mineralnykh soley i ras-solov* [The catalog on mineral salts and brine processing]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 452 p.
18. Lebedenko Yu.P. *Kristallizatsiya iz rastvorov v khimicheskoy promyshlennosti* [Crystallization from solutions in chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 48 p.
19. Lennikov O.D. *Zakonomernosti kristallizatsii neorganicheskikh soley iz vodnykh rastvorov. Aftoref. Dis. Dokt. nauk* [The laws of inorganic salts crystallization from aqueous solutions. Dr. Diss. Abstract]. Ekaterinburg, 2011. 46 p.
20. Matusevich L.N. *Kristallizatsiya iz rastvorov v khimicheskoy promyshlennosti*. [Crystallization from solutions in chemical industry]. Moscow, Khimik Publ., 1968. 304 p.
21. Safrygin Y.A., Osipova G.V., Buksha Y.V., Timofeev V.I. *Sposob polucheniya shenita* [The method of obtaining schoenite]. Patent RF, no. 2373151, 2009.

Received: 16 December 2014.

УДК 553.411.071:550.4

ОБЪЕМНОЕ ГЕОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

Гаврилов Роман Юрьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных
ископаемых Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета, Россия,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геолого-разведочных работ на рудное золото на основе создания прогнозно-поисковых моделей известных месторождений и их сравнения с перспективными объектами.

Цель работы: создание объемной геохимической модели месторождения для разработки прогнозно-поисковых критериев золотого оруденения.

Методы исследования: геохимическое картирование, математическая обработка результатов геохимических работ, моделирование геохимических полей методами многомерной статистики, геолого-генетическая интерпретация геохимических данных.

Результаты. Установлено, что распределение содержания золота и элементов-спутников в объеме месторождения не согласуется ни с одним из известных законов распределения. Наиболее контрастные аномалии в крупнообъемном метасоматическом ореоле создают Au, As, Ag и Pb. Примененный комплекс методов обработки геохимической информации обеспечил расшифровку аномальной структуры геохимического поля. Минерализованная зона расположена в центре крупнообъемного метасоматического ореола, совпадая в пространстве с высококонтрастными Co-Ni, Ag-Pb-Zn-Cu и As геохимическими ассоциациями. Вместе с тем, контуры минерализованной зоны картируются Co-Ni и Ag-Pb-Zn-Cu геохимическими ассоциациями, а ее центральная часть – As ассоциацией. Анализ распределения геохимических ассоциаций показал, что крупнообъемному метасоматическому ореолу свойственно концентрически-зональное строение. Распределение геохимических ассоциаций согласуется со стадийностью гидротермального минералообразования, установленной на месторождении. Очевидно, что образование трех геохимических ассоциаций указывает на различие в условиях и времени образования рудоносных растворов. С использованием горно-геологической программы Datamine studio 3 построена объемная геохимическая модель месторождения. Созданная объемная геохимическая модель золоторудного месторождения может способствовать выделению потенциально перспективных объектов.

Ключевые слова:

Золото, математическая статистика, аномальная структура геохимического поля, геохимическая зональность, объемная геохимическая модель.

Введение

Важным этапом исследования при прогнозировании и поисках рудных месторождений является их изучение и моделирование с применением современных горно-геологических программ. Совершенствуются известные и предлагаются новые методики обработки геохимической информации [1–7].

В основе прогноза оруденения лежат ранее созданные прогнозно-поисковые модели месторождений: геолого-геохимические, геолого-геофизические, геолого-структурные и др. С помощью созданных моделей можно проводить их сравнительный анализ с площадями и объектами с целью перспектив оценки на промышленное оруденение [8–17].

Ранее геохимические работы на месторождении Чертово Корыто проводились с целью реконструкции геологической истории химических элементов в рудовмещающем метасоматическом ореоле, а также для выявления объемной структуры геохимического ореола. Было установлено, что рудовмещающий золото-серебро-мышьяковый геохимический ореол месторождения представлен уплощенной объемной фигурой, которая ориентирована вдоль рудоконтролирующего и растворо-

подводящего разлома и полого погружается в западном направлении.

Целью данной работы является создание объемной геохимической модели месторождения для разработки прогнозно-поисковых критериев золотого оруденения. Ее создание проводилось на основе результатов, полученных при дешифрировании аномальной структуры геохимического поля (АСГП) [18].

Краткое геологическое описание месторождения

Геологическая характеристика месторождения подробно изложена в [19].

Месторождение располагается в северной части Иркутской области в Патомском нагорье (рис. 1) и относится к золотому оруденению черносланцевой формации. Залежь расположена в синклинальной брахискладке, сложенной раннепротерозойскими углеродистыми породами михайловской свиты (рис. 2). Породы толщи имеют углы падения от 0 до 10...20°. В складке установлены флексуры более высоких порядков. Толща состоит из пород, метаморфизованных до эпидот-амфиболитовой фации: аркозовых разномерных, мелкозернистых песчаников, алевролитов, аргиллитов. Содержание углерода в породах минерализованной зоны

варьирует от сотых до 2 мас. %. Метасоматические изменения пород выразились в наложении на них процессов пропилитизации и березитизации с образованием жил и прожилков золото-сульфидно-карбонат-кварцевого состава.



Рис. 1. Схема расположения месторождения Чертово Кoryто

Fig. 1. Map of location of deposit Chertovo Koryto

Протяженность рудной залежи, оконтуренной по бортовому содержанию 0,5 г/т и погружающейся в западном направлении под углами от 0 до 20°, составляет 1800 м, а ширина около 500 м. Ее максимальная мощность, зафиксированная в центральной части рудного тела, составляет 140 м. Концентрация золота в руде варьирует от $n \times 0,01$ до $n \times 100$ г/т. Размеры рудной залежи и количество запасов могут изменяться в зависимости от принятых кондиций.

Методика исследования

Месторождение Чертово Кoryто изучено с использованием керна вертикальных колонковых скважин. По результатам разведочных работ подсчитаны запасы соответствующих категорий. Проведено опробование керна скважин: секционное керновое – для определения содержания золота, и секционное сколковое – для оценки содержания элементов-спутников золотого оруденения и характера их поведения в пределах рудной зоны. Длина проб керна в среднем составляла 1 м, длина секций сколкового опробования – 3 м. Объемная геохимическая модель построена на основании детального изучения 6 разведочных буровых профилей.

Пробы на золото анализировались пробирным и атомно-абсорбционным методами в лабораториях Ленской золоторудной компании. Чувствительность методов составляла 0,1 и 0,01 г/т соответственно.

Содержание элементов-спутников оруденения анализировалось эмиссионным спектральным полуквантитативным методом в лаборатории Бодайбинской геологоразведочной экспедиции. Наибо-

лее полно определены Ag, As, Pb, Co, Cu, Ni, Zn. Определение остальных элементов проведено в ограниченном количестве и не могло быть использовано в проведении основных статистических расчетов.

Комплексные показатели рассчитаны с использованием аналитических данных, полученных по секционным сколковым пробам ($n > 4000$). Фоновые содержания элементов определены по результатам анализов 170 проб, отобранных из скважин, расположенных за пределами рудно-метасоматических зон.

При построении объемной геохимической модели и расшифровке АСПП проведены расчеты ранговой корреляции, энергии рудообразования, дисперсии и вариации геохимического спектра, проводился кластерный и факторный анализы.

Пространственное распределение золота и элементов-спутников

Распределение содержания золота и элементов-спутников в объеме месторождения не согласуется ни с одним из законов распределения.

Высококонтрастный ореол золота представлен крупнообъемным телом, простирающимся в субмеридиональном направлении (рис. 2). Для внутреннего строения ореола характерны тела трубообразной, игловидной и плитообразной формы. В пределах рудной зоны концентрации элемента превышают кларковый уровень на несколько порядков. В южном направлении наблюдается заметное уменьшение объемов ореолов и рудных зон.

В пределах месторождения преобладают субкларковые содержания серебра. Ореол серебра характеризуется гнездовым строением. Большая часть объема, занимаемого ореолами, представлена умеренно контрастными содержаниями. Умеренно- и высоко контрастные ореолы представлены телами трубообразной и иглообразной формы.

В объеме месторождения высококонтрастный ореол мышьяка имеет овалообразное вытянутое тело, которое занимает практически все пространство рудной зоны. Внутренние ореолы представлены телами трубообразной, пламенивидной и иглообразной форм. Почти все пространство рудной зоны занято ореолами с содержанием элемента, превышающим кларковый уровень на несколько порядков. Повышенные концентрации мышьяка связаны, прежде всего, с его минералом-носителем – арсенопиритом, и совсем незначительно с другими сульфидами.

Основной объем месторождения занят субкларковыми концентрациями свинца. Умеренно контрастные ореолы характеризуются гнездовым распределением. Для них свойственна трубообразная и иглообразная формы. Повышенные концентрации связаны с основным минералом-носителем свинца, обнаруженным в рудной зоне, – галенитом.

Наибольший объем рудовмещающего метасоматического ореола занят субкларковыми содер-

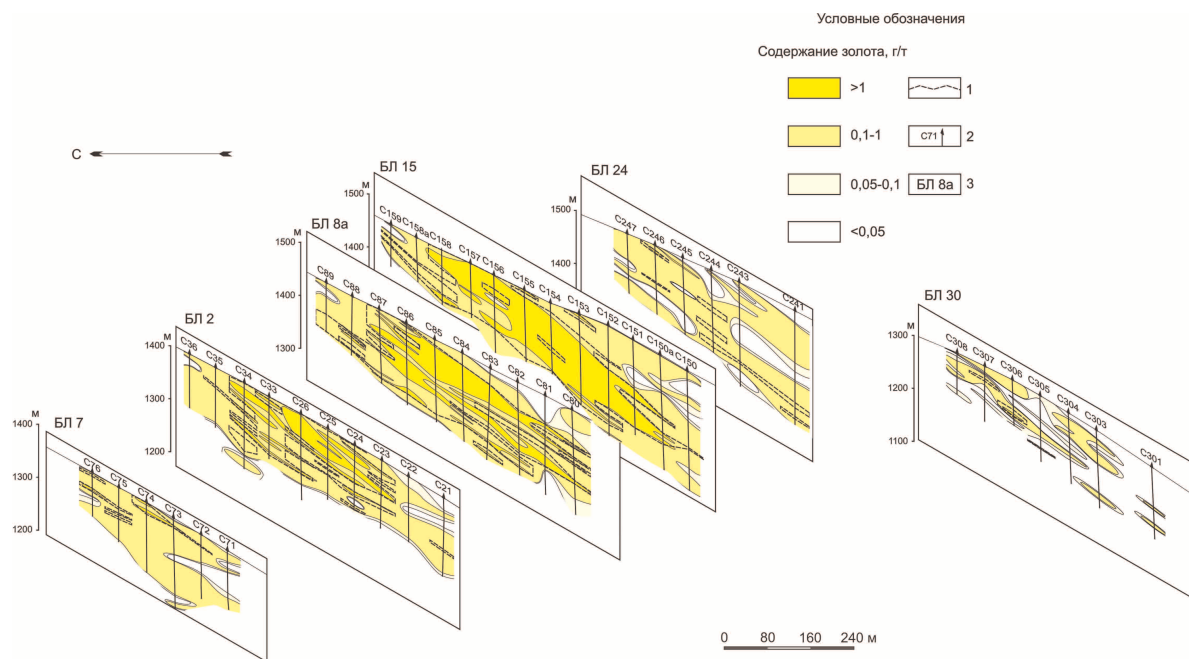


Рис. 2. Блок-диаграмма распределения золота в рудовмещающем метасоматическом ореоле месторождения [20]: 1) контуры рудных тел; 2) разведочные скважины и их номера; 3) буровые линии и их номера

Fig. 2. Block diagram of gold distribution in ore-hosting metasomatic halo of the deposit [20]: 1) ore outline; 2) exploratory wells and their numbers; 3) drilling lines and their numbers

жаниями **цинка**. Слабоконтрастный ореол представлен вытянутым овалообразным телом. Строе-ние ореола характеризуется гнездами овалообраз-ной, трубообразной, изометричной, реже иглооб-разной формы. Вероятнее всего, повышенные со-держания элемента связаны со сфалеритом.

В объеме месторождения контрастный ореол **кобальта** имеет вытянутое овалообразное тело. Внутреннее строение ореола характеризуется тру-бообразными, плитообразными, изометричными телами. В бо-льшей части рудной зоны концен-трации элемента значительно превышают кларковый уровень. Наличие контрастных ореолов обусловле-но присутствием в пределах крупнообъемного ме-тасоматического ореола кобальтина и других суль-фидных минералов.

Наличие контрастных ореолов **никеля** обусло-влено присутствием в пределах метасоматического ореола его минерала-носителя – пирротина, а так-же кобальтина и ряда других минералов, содержа-щих его в виде примеси. В пределах контура руд-ной зоны расположены ореолы различной интен-сивности. Случаи совмещения наиболее контраст-ных ореолов с высококонтрастными ореолами зо-лота крайне редки.

Основное пространство рудовмещающего мета-соматического ореола занято умеренноконтраст-ными концентрациями **меди**. Внутреннее строение ореола представлено системой тел трубообразной, изометричной и иглообразной форм.

Таким образом, наиболее контрастные анома-лии в крупнообъемном метасоматическом ореоле создают Au, As, Ag и Pb.

Обсуждение результатов и выводы

Дешифрирование АСПП проведено с примене-нием методов математической статистики.

Методом *ранговой корреляции* установлено, что значимая положительная корреляционная связь характерна для всех рудогенных элементов, но провести их разделение на отдельные группы не представляется возможным.

Интенсивность процессов гидротермально-ме-тасоматического рудообразования характеризуют комплексные показатели *энергии рудообразования* [21], *дисперсии и вариации геохимического спек-тра* [22].

Энергия рудообразования рассчитывалась на основе суммирования произведений кларков кон-центрации элементов на их логарифмы. Фоновые значения изменяются от –1 до 2 ед. и в пределах минерализованной зоны отмечаются очень редко. Значения показателя достигают 10^4 ед. и более. Ве-личина энергии рудообразования проявляет пря-мую зависимость от значения содержания As.

Метод, позволяющий оценивать степень диф-ференциации вещества по геохимическому спек-тру всех определенных химических элементов в единичной пробе, впервые использован И.И. Выбо-ровым и С.Г. Быстровым [21]. Показатели диспер-сии и вариации геохимического спектра (ДГС и ВГС соответственно) рассчитываются на основе стандартных формул дисперсии и вариации нор-мированных концентраций элементов.

В объеме минерализованной зоны значения ДГС значительно увеличиваются. Максимальные концентрации показателя составляют 10^5 ед. и бо-

лее. Аномальные содержания мышьяка в наибольшей степени влияют на значения комплексного показателя. Этим фактом и объясняется пространственное совмещение ореолов.

Значения ВГС и ДГС в объеме месторождения распределены по-разному. Контуры минерализованной зоны выделяются по высококонтрастным ореолам ВГС, что, вероятно, обусловлено существенным отличием в концентрациях элементов в объеме минерализованной зоны и в ее обрамлении. Установлено, что неравномерный характер распределения содержания рудогенных элементов картируется значениями показателя $ВГС > 140 \%$.

Очевидно, что показатели, характеризующие интенсивность процессов рудообразования, помогают установить границы зон гидротермально-метасоматического изменения, но не способствуют дешифрированию АСГП рудных объектов.

По отличительным особенностям геохимического спектра с использованием *кластер-анализа* выделено 5 классов проб.

Для первого и четвертого класса проб не выявлено элементов существенно влияющих на их геохимический спектр. Второй кластер характеризуется обособлением Cu, Zn, Ag, Pb, связанных со становлением галенит-халькопирит-сфалеритовой минеральной ассоциации. В третьем классе проб высокими содержаниями отличаются Co и Ni, зафиксированные в результате отложения пирит-пирротиновой минеральной ассоциации. Последний, пятый, кластер характеризуется доминирующей ролью As, который принимал активное участие в становлении арсенопирит-пирит-пирротиновой ассоциации. Выделенные геохимические ассоциации хорошо соотносятся со стадиями минералообразования, установленными по результатам ранее проведенных геологических исследований [19]. Ограниченное количество проанализированных элементов не позволило установить четкую картину зонального строения геохимических ассоциаций.

Для выявления ассоциаций рудогенных элементов с идентичным поведением в геохимических процессах был проведен *факторный анализ*. Выделено три ассоциации, вклад которых в общую дисперсию составляет 64 %.

Первый фактор, с вкладом в общую дисперсию 30 %, характеризуется наибольшими нагрузками Pb, Zn, Ag. Наибольшее воздействие на *второй фактор*, с вкладом в общую дисперсию 20 %, оказывают Co, Cu, Ni. *Третий фактор* характеризуется существенной нагрузкой на него одного элемента – As. Таким образом, это свидетельствует о привносе рудогенных элементов в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования. Установленные геохимические ассоциации корреспондируют со стадийностью минералообразования [19]. Очевидно, что образование трех геохимических ассоциаций указывает на различие в условиях и времени образования рудоносных растворов.

Результаты обработки геохимических данных статистическими методами позволили построить объемную геохимическую модель золоторудного месторождения Чертово Кoryто (рис. 3).

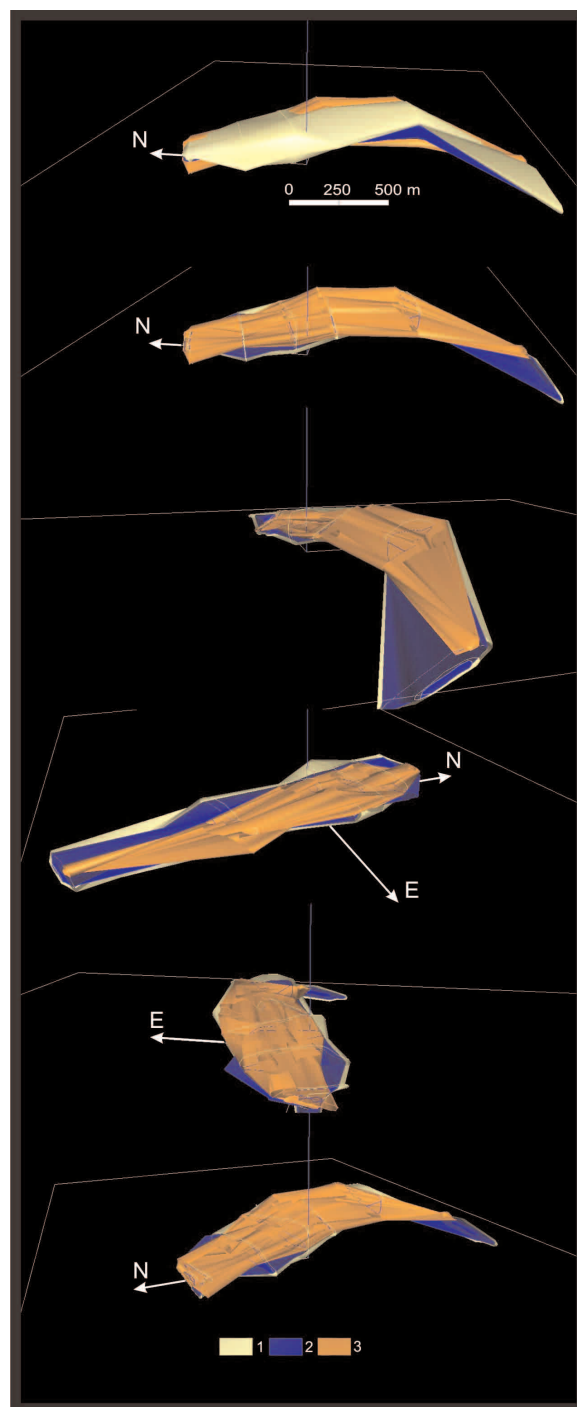


Рис. 3. Объемная геохимическая модель золоторудного месторождения Чертово Кoryто. 1 – Co-Ni ассоциация, 2 – Ag-Pb-Zn-Cu ассоциация; 3 – As ассоциация

Fig. 3. Three-dimentional geophysical model of gold ore deposit Chertovo Koryto1 – Co-Ni association, 2 – Ag-Pb-Zn-Cu association; 3 – As association

По результатам ранее проведенных работ установлено, что основная масса золота отлагалась в

галенит-халькопирит-сфалеритовую стадию минералообразования.

Минерализованная зона расположена в центре крупнообъемного метасоматического ореола, совпадая в пространстве с высококонтрастными Co-Ni, Ag-Pb-Zn-Cu и As геохимическими ассоциациями. Вместе с тем контуры минерализованной зоны картируются Co-Ni и Ag-Pb-Zn-Cu геохимическими ассоциациями, а ее центральная часть – As ассоциацией.

Контрастный ореол Co-Ni ассоциации совпадает в пространстве с контурами рудного тела, фрагментарно с Ag-Pb-Zn-Cu ассоциацией, занимая при этом наиболее периферийные части минерализованной зоны. Co и Ni привнесены ранними гидротермальными растворами и отложены с пирит-пирротиновой минерализацией. Для второй группы характерно наличие одного элемента – As. Его отложение, в основном в виде арсенопирита, происходило во время становления арсенопирит-пирит-пирротиновой минерализации.

Установлено концентрически-зональное строение геохимических ассоциаций в пределах крупно-

объемного метасоматического ореола (от центральной части к периферии): As→Ag-Pb-Zn-Cu→Co-Ni. Выявленную закономерность в пространственном распределении геохимических ассоциаций можно применять при проведении поверхностных (площадные литогеохимические исследования) и глубинных (скважины, горные выработки) исследований на перспективных площадях.

Использованный набор методов обработки геохимической информации позволил расшифровать АСП и установить ее концентрически-зональное строение. Наиболее значимые результаты при обработке геохимических данных по месторождению Чертово Корято были получены с применением методов математической статистики: кластерного и факторного анализов. Это позволило локализовать границы золотого оруденения в пределах изучаемого объема недр.

Созданная объемная геохимическая модель золоторудного месторождения может способствовать выделению потенциально перспективных объектов на лицензионных участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшкин Н.П. Топоминералогия. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
2. Григоров С.А. Основы структурной интерпретации геохимических полей рудных объектов для целей их локализации и оценки // Отечественная геология. – 2007. – № 4. – С. 45–52.
3. Чекваидзе В.Б., Миляев С.А. Эндеогенные ореолы сидерофильных элементов золоторудных месторождений // Руды и металлы. – 2009. – № 6. – С. 15–20.
4. Иванов А.И. Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском рудном районе // Отечественная геология. – 2008. – № 6. – С. 11–16.
5. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Мацюшевский А.В. Особенности кристалломорфологии и термо-эдс пиритов золоторудных месторождений различных типов // Известия Томского политехнического института. – 1976. – Т. 260. – С. 39–48.
6. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и ее использование в практике поисково-разведочных работ на золото // Геология и геофизика. – 1989. – № 11. – С. 65–75.
7. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits / A.Y. Pshenichkin, Y.A. Oskina, O.V. Savinova, T.F. Dolgaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–4. URL: http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012005/pdf/1755-1315_21_1_012005.pdf (дата обращения: 20.03.2015).
8. The major gold concentration areas in China and their resource potentials / C.-H. Wang, D.-H. Wang, F. Huang, J. Xu, Z.-H. Chen, L.-J. Ying, S.-B. Liu // *Geology in China*. – 2012. – V. 39. – № 5. – P. 1125–1142.
9. Wang X., Xie X., Ye S. Concepts for geochemical gold exploration based on the abundance and distribution of ultrafine gold // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1995. – V. 55. – № 1–3. – P. 329–336.
10. Yilmaz H. Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure // *J. Geochem. Explor.* – 2003. – V. 80. – № 1. – P. 117–135.
11. Геолого-геохимические особенности гигантских месторождений золота в черных сланцах Центральной Азии / М.С. Рафаилович, И.М. Голованов, О.А. Федоренко и др. // Поисковая геохимия: теоретические основы, технологии, результаты. – Алматы: НИИ природных ресурсов ЮГГЕО, 2004. – С. 67–83.
12. Григоров С.А. Отражение в геохимическом поле рудообразующей системы, как объекта геохимических поисков // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 5. – С. 8–13.
13. Гаврилов Р.Ю., Хряпин Д.А. Структура геохимического поля мезотермального золоторудного месторождения Западное (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 137–146.
14. Григоров С.А. Золотоносные метасоматиты Центральной Колымы, их потенциал и перспективы освоения // Руды и металлы. – 2014. – № 5. – С. 45–49.
15. Voroshilov V.G., Savinova O.V., Ananjev Y.S., Abramova R.N. Anomaly Geochemical Fields in Siberian Hydrothermal Gold Deposits // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–6. URL: http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012009/pdf/1755-1315_21_1_012009.pdf (дата обращения: 20.03.2015).
16. Structure-geochemical zoning of Topolninsk gold-ore field (Gorny Altai) / T.V. Timkin, D.S. Lavrov, O.Y. Askanakova, T.V. Kotchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – V. 21. – P. 1–6. URL: (дата обращения: 20.03.2015). http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012010/pdf/1755-1315_21_1_012010.pdf
17. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern altai-sayany folded region // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 1. – 2014. – P. 341–344.
18. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – С. 3–19.
19. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 11–20.
20. Геохимическая зональность рудовмещающего ореола мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) / Р.Ю. Гаврилов, И.В. Кучеренко, В.Г. Мар-

- тыненко, А.В. Верхоzin // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 42–47.
21. Выборов С.Г., Быстров И.И. Опыт использования комплексного показателя нарушенности геохимического поля для прогнозирования оруденения // Известия вузов. Геология и разведка. – 1990. – № 4. – С. 102–110.
22. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. / под общ. ред. Н.И. Марочкина. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.

Поступила 26.03.2015 г.

UDC 553.411.071:550.4

VOLUMETRIC GEOCHEMICAL MODELING OF GOLD OBJECTS ON THE EXAMPLE OF DEPOSIT CHERTOVO KORYTO (PATOM UPLAND)

Roman Y. Gavrilov,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

The relevance of the study is caused by the need to improve the efficiency of exploration work on the gold ore through the creation of predictive models of known deposits and their comparison with promising targets.

The main aim of the research is to create a bulk geochemical field model to develop the forecasting and prospecting criteria of gold mineralization.

Research methods: geochemical mapping, mathematical processing of the results of geochemical work, modeling of geochemical fields by the methods of multivariate statistics, geological and genetic interpretation of geochemical data

Results. It was ascertained that gold and trace elements distribution in the field volume does not fit any known distribution laws. The most contrasting anomalies in high-volume metasomatic aureole are created by Au, As, Ag and Pb. The applied complex of techniques for processing geochemical information helped to decipher the abnormal structure of geochemical field. The mineralized zone is located in the center of large-volume metasomatic aureole, coinciding in space with high contrast Co-Ni, Ag-Pb-Zn-Cu and As geochemical associations. The contours of the mineralized zone are mapped by Co-Ni and Ag-Pb-Zn-Cu geochemical associations, and its central part is mapped by As association. Analysis of geochemical associations distribution showed that the concentric-zonal structure is typical for large-volume metasomatic aureole. Distribution of geochemical associations fits the staging of hydrothermal mineralization set in the field. It is obvious that the formation of three geochemical associations indicates a difference in conditions and time of formation of ore-bearing solutions. Using mining and geological program Datamine studio 3 the author has made the bulk geochemical model of the deposit. The model of gold deposit may contribute to allocation of potentially interesting objects.

Key words:

Gold, mathematical statistics, anomalous structure of geochemical field, geochemical zonality, volumetric geochemical model.

REFERENCES

1. Yushkin N.P. *Topomineralogiya* [Topo-mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 288 p.
2. Grigorov S.A. Osnovy strukturnoy interpretatsii geokhimicheskikh poley rudnykh objektov dlya tseyey ikh lokalizatsii i otsenki [Fundamentals of structural interpretation of ore object of geochemical fields for their localization and evaluation]. *Otechestvennaya geologiya*, 2007, vol. 4, pp. 45–52.
3. Chekvaidze V.B., Milyaev S.A. Endogennyye oreoly siderofilnykh elementov zolotorudnykh mestorozhdeniy [Endogenous halos of siderophilic elements of gold deposits]. *Rudy i metally*, 2009, no. 6, pp. 15–20.
4. Ivanov A.I. Opyt prognozirovaniya, poiskov i otsenki novykh zolotorudnykh mestorozhdeniy v Bodaybinskom rudnom rayone [Experience of forecasting, searching and assessing new gold fields in the Bodaybinsky ore area]. *Otechestvennaya geologiya*, 2008, no. 6, pp. 11–16.
5. Pshenichkin A.Ya., Pedlars A.F., Matsyushevsky A.V. Osobennosti kristallomorfologii i termo-eds piritov zolotorudnykh mestorozhdeniy razlichnykh tipov [Features of kristallomorfologiya and thermo-EMF of pyrites of gold fields of various types]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1976, vol. 260, pp. 39–48.
6. Pshenichkin A.Ya. Kristallomorfologiya pirita i ee ispolzovanie v praktike poiskovo-razvedochnykh rabot na zoloto [Pyrite crystal morphology and its use in exploration for gold]. *Russian Geology and Geophysics*, 1989, no. 11, pp. 65–75.
7. Pshenichkin A.Y., Oskina Y.A., Savinova O.V., Dolgaya T.F. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–4. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012005/pdf/1755-1315_21_1_012005.pdf (accessed 20.03.2015).
8. Wang C.-H., Wang D.-H., Huang F., Xu J., Chen Z.-H., Ying L.-J., Liu S.-B. The major gold concentration areas in China and their resource potentials. *Geology in China*, 2012, vol. 39, no. 5, pp. 1125–1142.
9. Wang X., Xie X., Ye S. Concepts for geochemical gold exploration based on the abundance and distribution of ultrafine gold. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, V. 55, no. 1–3, pp. 329–336.
10. Yilmaz H. Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure. *Journal Geochemical Exploration*, 2003, vol. 80, no. 1, pp. 117–135.
11. Rafailovich M.S., Golovanov I.M., Fedorenko O.A. Geologo-geokhimicheskie osobennosti gigantskikh mestorozhdeniy zolota v chernykh slantsakh Tsentralnoy Azii [Geological and geochemical features of giant gold deposits in black slate]. *Poiskovaya geokhimiya: teoreticheskie osnovy, tekhnologii, rezultaty* [Search geoche-

- mistry: theory, technologies, results]. Almaty, NII prirodnikh resursov JuGGEO, 2004. pp. 67–83.
12. Grigorov S.A. Otrazhenie v geokhimicheskom pole rudoobrazuyushchey sistemy, kak obekta geokhimicheskikh poiskov [Reflection of ore-forming system as an object of geochemical searches in geochemical field]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2009, no. 5, pp. 8–13.
 13. Gavrilov R.Yu., Khryapin D.A. Struktura geokhimicheskogo polya mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Zapadnoe (Lensky rudnyy rayon) [Geochemical field structure of mesothermal gold ore deposit Zapadnoe (Lensk ore area)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 137–146.
 14. Grigorov S.A. Zolotonosnye metasomatity Tsentralnoy Kolymy, ikh potentsial i perspektivy osvoeniya [Gold-bearing metasomatites of the Central Kolyma, their potential and prospects of development]. *Rudy i metally*, 2014, no. 5, pp. 45–49.
 15. Voroshilov V.G., Savinova O.V., Ananjev Y.S., Abramova R.N. Anomaly Geochemical Fields in Siberian Hydrothermal Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012009/pdf/1755-1315_21_1_012009.pdf (accessed 20.03.2015).
 16. Timkin T.V., Lavrov D.S., Askanakova O.Y., Korotchenko T.V. Structure-geochemical zoning of Topolninsk gold-ore field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6. Available at: http://iopscience.iop.org/1755-1315/21/1/012010/pdf/1755-1315_21_1_012010.pdf (accessed 20.03.2015).
 17. Chernykh A.I. The permian-triassic gold mineralisation of the northwestern Altai-Sayany folded region. *International Multi-disciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 1*. 2014. pp. 341–344.
 18. Voroshilov V.G. Anomальные структуры геокхимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика geometrizations, типовые модели, прогноз масштабов оруденения [Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization]. *Geology of the ore deposit*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
 19. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologo-geokhimicheskie cherty rudovmeshchayushchego metasomaticheskogo oreola zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Petrological and geochemical features of ore-bearing metasomatic halo of gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 11–20.
 20. Gavrilov R.Yu., Kucherenko I.V., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Geokhimicheskaya zonalnost rudovmeshchayushchego oreola mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Geochemical zoning of ore-hosting mesothermal gold deposit Chertovo Koryto (Patom upland)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 42–47.
 21. Vyborov S.G., Bystrov I.I. Opyt ispolzovaniya kompleksnogo pokazatelya narushennosti geokhimicheskogo polya dlya prognozirovaniya orudeneniya [Experience in using composite indicator of geochemical field fracturing to predict mineralization]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 4, pp. 102–110.
 22. Safronov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudoobrazovaniya i poiski poleznykh iskopaemykh* [Ore formation energy and mineral exploration]. Ed. N.I. Marochkin. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.

Received: 26 March 2015.

УДК 62–83: 531.3

К ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ ГЛОНАСС

Толстиков Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор каф. систем сбора и обработки данных
Факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского
государственного технического университета, Россия, 630073,
г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: tolstikov@mail.kns.ru

Ханыкова Екатерина Андреевна,

науч. сотр. Государственной службы времени, частоты и определения
параметров вращения Земли ФГУП «Сибирский ордена Трудового
Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии»,
Россия, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4. E-mail: hanikovak@mail.ru

Для пользователей, выполняющих работы в области геологии, геодинимики, разведки и добычи природных ископаемых, разработки нефтяных и газовых месторождений на участках прибрежных шельфов, перспективным направлением является использование высокоточных навигационных измерений. Требования этого круга специальных потребителей к точности и качеству навигационно-временного обеспечения постоянно возрастают. Повышение точности и надежности навигационных измерений можно достичь путем решения задачи контроля параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников системы ГЛОНАСС, что делает данную работу актуальной.

Цель работы: оценивание параметров нестабильности бортовых часов орбитальной группировки ГЛОНАСС, в значительной степени определяющих качество и достоверность координатно-временных измерений на основе спутниковых навигационных технологий.

Методы исследования: метод исключения ионосферной задержки по двухчастотным измерениям, метод оценивания фазовой неоднозначности, метод Х. Хопфилда для компенсации тропосферной задержки, метод статистического оценивания уходов бортовых часов навигационных спутников по результатам траекторных измерений.

Результаты. Предложен метод оценивания уходов бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС на базе программно-аппаратного комплекса метрологического пункта Государственной службы времени и частоты Сибирского ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института метрологии «СНИИМ». Основное внимание уделено использованию в качестве исходной информации в алгоритмах оценивания фазовых псевдодальномерных измерений. Выделяются и описываются характерные особенности использования таких измерений, в частности, проблема разрешения фазовой неоднозначности. Также для получения высокоточных результатов авторы привлекали алгоритмы предварительной обработки псевдодальномерных измерений с целью снижения уровня шума, применения компенсирующих поправок к ионосферной и тропосферной задержкам навигационного сигнала. Результатами исследований являются оценки уходов бортовых шкал времени орбитальной группировки ГЛОНАСС и статистические характеристики погрешностей представления этих шкал с помощью частотно-временных поправок. Также достоинством разработанного метода является достижение высокой точности за счет использования государственного вторичного эталона времени, частоты и момента шкалы ВЭТ 1–19. Полученные авторами оценки составляют основу для контроля частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС, что является одной из задач метрологического пункта Государственной службы времени и частоты.

Выводы. Авторы предлагают использование методики контроля частотно-временных параметров навигационного спутника ГЛОНАСС в целях повышения точностных характеристик корректирующих поправок, формируемых сетью активных базовых наземных станций Новосибирской области.

Ключевые слова:

Разведка и добыча природных ископаемых, разработка нефтяных и газовых месторождений, бортовые шкалы времени, координатно-временные определения, траекторные фазовые измерения, ГЛОНАСС, фазовая неоднозначность, частотно-временные поправки, нестабильность частоты генератора часов, ГНСС.

Введение

В настоящее время спутниковые навигационные технологии всё больше применяются во многих отраслях экономики РФ. Специалистам, выполняющим работы в области геологии, исследования природных ресурсов [1], добычи и разработки нефтяных и газовых месторождений на участках прибрежных шельфов [1, 2], а также управления транспортом, требуются высокоточные измерения. Требования этого круга специальных потребителей к точности и качеству навигационно-временного обеспечения постоянно возрастают. Повы-

шение точности этих измерений можно достичь за счёт модернизации отечественной навигационной системы ГЛОНАСС, совершенствования существующих и привлечения новых измерительных технологий.

Точность и надежность координатно-временных определений (КВО) на основе применения спутниковых навигационных технологий существенным образом зависит от качества частотно-временного обеспечения глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС). Это связано с тем обстоятельством, что все измерения дальностей от

навигационных спутников до потребителя сводятся к измерениям интервалов времени, необходимых для прохождения навигационного сигнала от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя.

Измерения указанных интервалов времени производятся относительно действительных моментов шкалы бортовых часов, а отсчет измеренных интервалов в аппаратуре потребителя происходит от моментов аналитической шкалы времени, рассчитанной с помощью частотно-временных поправок (ЧВП), транслируемых в составе навигационного сигнала. Возрастающие требования к точности позиционирования на основе ГНСС технологий делают актуальной задачу контроля правильности представления положений бортовых шкал времени с помощью ЧВП [3–7].

В работе описана организация контроля согласованности бортовых и аналитических шкал времени орбитальной группировки навигационных спутников ГЛОНАСС по данным беззапросных фазовых измерений в условиях применения эталона времени и частоты ВЭТ 1–19 ФГУП «СНИИМ».

Постановка задачи контроля

Исходными данными для решения задач КВО в сегменте потребителя ГНСС являются результаты псевдодальномерных фазовых измерений по каждому спутнику $\varphi(t) = N(t)\lambda$, связанных с геометрической дальностью $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$ уравнением измерений

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r) + [\Delta T_s(t) + \Delta T_r(t)]c + K\lambda + \sum_{i=1}^n q_i(t),$$

в котором $N(t)$ – измеренное число периодов несущей частоты, укладываемой на радиотрассу от спутника до потребителя; λ – длина волны несущей; $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$ – геометрическая дальность от передающей антенны спутника с координатами $\mathbf{u}_s^T = [x_s(t), y_s(t), z_s(t)]$ до приемной антенны потребителя с координатами $\mathbf{u}_r^T = [x_r(t), y_r(t), z_r(t)]$;

$\Delta T_s(t) = \Delta T_{s\phi}(t) - \Delta T_{sa}(t)$ – отклонения момента бортовой шкалы времени $\Delta T_{s\phi}(t)$ от момента шкалы Центрального синхронизатора ГНСС $T(t)$ после коррекции этого момента с помощью аналитической шкалы $\Delta T_{sa}(t)$, рассчитанной с применением бортовых ЧВП; $\Delta T_r(t)$ – отклонение момента шкалы времени приемника от шкалы Центрального синхронизатора ГНСС; c – скорость распространения радиосигнала; K – неопределенное целое число периодов частоты несущей, связанное с неоднозначностью фазовых измерений; $q_i(t)$ – факторы, влияющие на точность фазовых псевдодальномерных измерений, к которым относятся задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, неучтенные задержки навигационного сигнала в передающих и приемных радиотрактах аппаратуры, эффекты от многолучевости распространения навигационного сигнала, релятивистские эффекты и другие влияющие факторы [3, 6–12].

Возникновение погрешностей псевдодальномерных фазовых измерений от несогласованности положений моментов действительной $\Delta T_{s\phi}(t)$ и аналитической $\Delta T_{sa}(t)$ бортовых шкал времени иллюстрируется рис. 1, где приведены: шкала времени центрального синхронизатора ГНСС $T_{\text{ЦС}}$, бортовая шкала T_s и шкала потребителя T_r .

Видно, что фактические уходы шкал времени бортовых часов $\Delta T_s(t)$ и уходы шкалы времени часов потребителя $\Delta T_r(t)$ от моментов шкалы времени центрального синхронизатора ГНСС, связанных с моментом излучения навигационного сигнала T_A и момента прихода этого сигнала к потребителю T_B , приводят к возникновению погрешности измерения интервала времени $\Delta\tau = \tau^* - \tau$, который является мерой геометрической дальности $\rho(\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r)$.

Тенденции к уходам шкал времени часов от эталонных шкал определяются нестабильностями частоты генераторов этих часов. Величина ухода шкал $\Delta T(t)$ связана с относительной нестабильностью частоты генератора часов $\omega(t) = \Delta f(t)/f(t)$ диф-

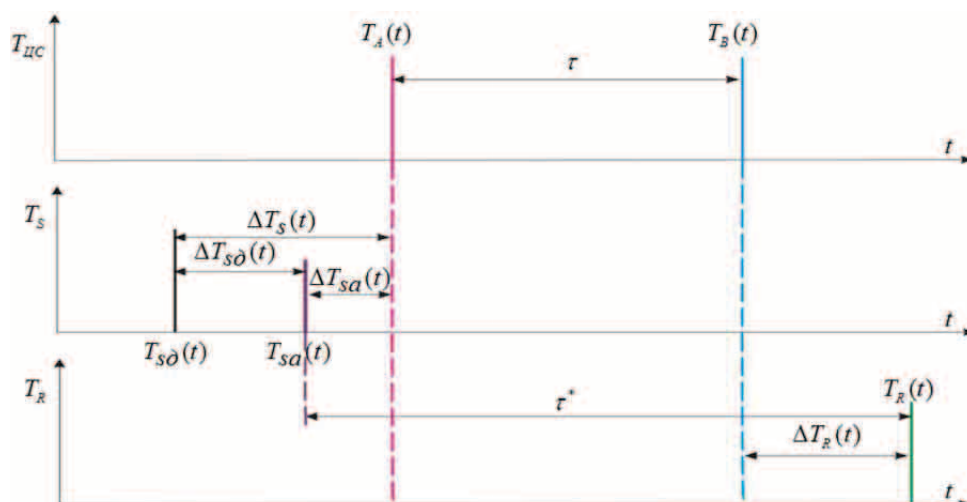


Рис. 1. Возникновение погрешностей от несогласованности действительной и аналитической бортовых шкал времени

Fig. 1. Occurrence of errors of due to inconsistency of real and analytical onboard timescales

ференциальным уравнением $\Delta\dot{T}(t)=\omega(t)$, $\Delta T(0)$, которое является математической моделью нестабильности часов. Частотно-временные поправки, предназначенные для компенсации уходов бортовых часов, представляют собой оценки параметров $\Delta\Delta T(k)$ и $\omega(k)$ некоторой упрощенной математической модели нестабильности часов, транслируемые потребителю каждые 30 минут [3, 13]. Точность такой компенсации зависит от адекватности использованной математической модели нестабильности часов и точности оценивания параметров этой модели.

Задача текущего контроля согласованности бортовой и аналитической шкалы времени сводится к текущему оцениванию положения бортовой шкалы $T_s(t)$ по данным псевдодальномерных фазовых измерений $\varphi(t)$. При этом требуется предварительная подготовка этих данных за счет компенсации с достаточной точностью в уравнении измерений составляющих $\rho(u_s, u_R)$, $c\Delta T_R(t)$, $K\lambda$, $q_i(t)$ [14–21].

Результаты контроля

Контроль бортовых шкал времени орбитальной группировки ГНСС организован в пункте метрологического контроля Государственной службы времени и частоты «СНИИМ». Использовался аппаратный комплекс эталона времени и частоты ВЭТ 1–19 и прецизионная аппаратура приема спутниковых навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS, антенные модули которой установлены на пунктах с известными с высокой точностью в системе ITRF координатами. Это обеспечило высокоточное оценивание $\rho(u_s, u_R)$ и применение в качестве опорной эталонной шкалы времени, для которой $\Delta T_R(t) \equiv 0$.

В качестве методической основы для рассматриваемой задачи применена технология Precise Point Positioning (PPP) [18, 20], использующая в качестве исходных данных высокоточные фазовые псевдодальномерные измерения и опирающаяся на высокоточные апостериорные эфемеридно-временные данные. Также в работе использовалась компенсация ионосферных и тропосферных задержек с помощью соответствующих математических моделей этих задержек и разрешение фазовых неоднозначностей измерений [14, 15].

Разработаны алгоритмы и соответствующие им программные приложения для текущего оценивания бортовых шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС. Проведены эксперименты по расчету бортовых шкал времени и оценке погрешностей представления этих шкал времени с помощью ЧВП. Для оценивания использовались результаты псевдодальномерных фазовых измерений в формате RINEX, полученные с помощью аппаратуры JAVAD 02.09.2014 г. с привлечением бортовой эфемеридной информации.

На рис. 2 видно, что действительные значения момента шкалы времени спутника R123 отклоня-

ются относительно соответствующих им значений аналитической шкалы (кусочно-линейная функция), что говорит об ошибочном оценивании частоты генератора бортовых часов спутника. Для R115 неверно введена коррекция момента шкалы времени. Исправить положение может применение дополнительных частотно-временных поправок, рассчитанных в условиях применения аппаратуры эталона ВЭТ 1–19.

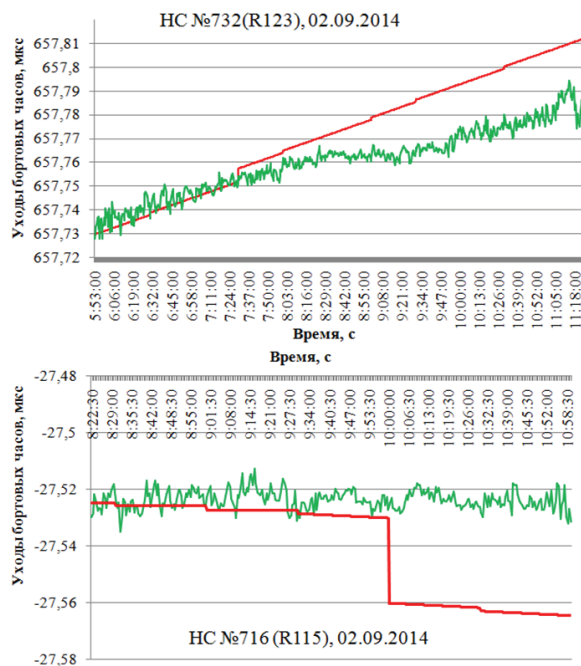


Рис. 2. Поведение действительной и аналитической шкалы времени навигационных спутников ГЛОНАСС R723 и R716

Fig. 2. Behavior of real and analytic timescales of the navigation satellite GLONASS R723 and R716

Результаты экспериментов показали хорошую согласованность с результатами оценивания таких погрешностей, приведенных в бюллетенях системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [13].

На рис. 3 приведены в виде диаграмм результаты контроля всей орбитальной группировки навигационных спутников ГЛОНАСС по данным фазовых измерений, полученных в метрологических пунктах Государственной службы времени и частоты в г. Новосибирск, Москва и Иркутск.

Проведенный анализ показал, что точность результатов контроля бортовых шкал может быть повышена за счет:

- применения алгоритмов предварительной обработки результатов измерений с целью фильтрации шумов и качественного подавления влияющих факторов;
- привлечения результатов фазовых измерений;
- использования апостериорных эфемерид для расчетов геометрических дальностей от спутников до антенн метрологического пункта.

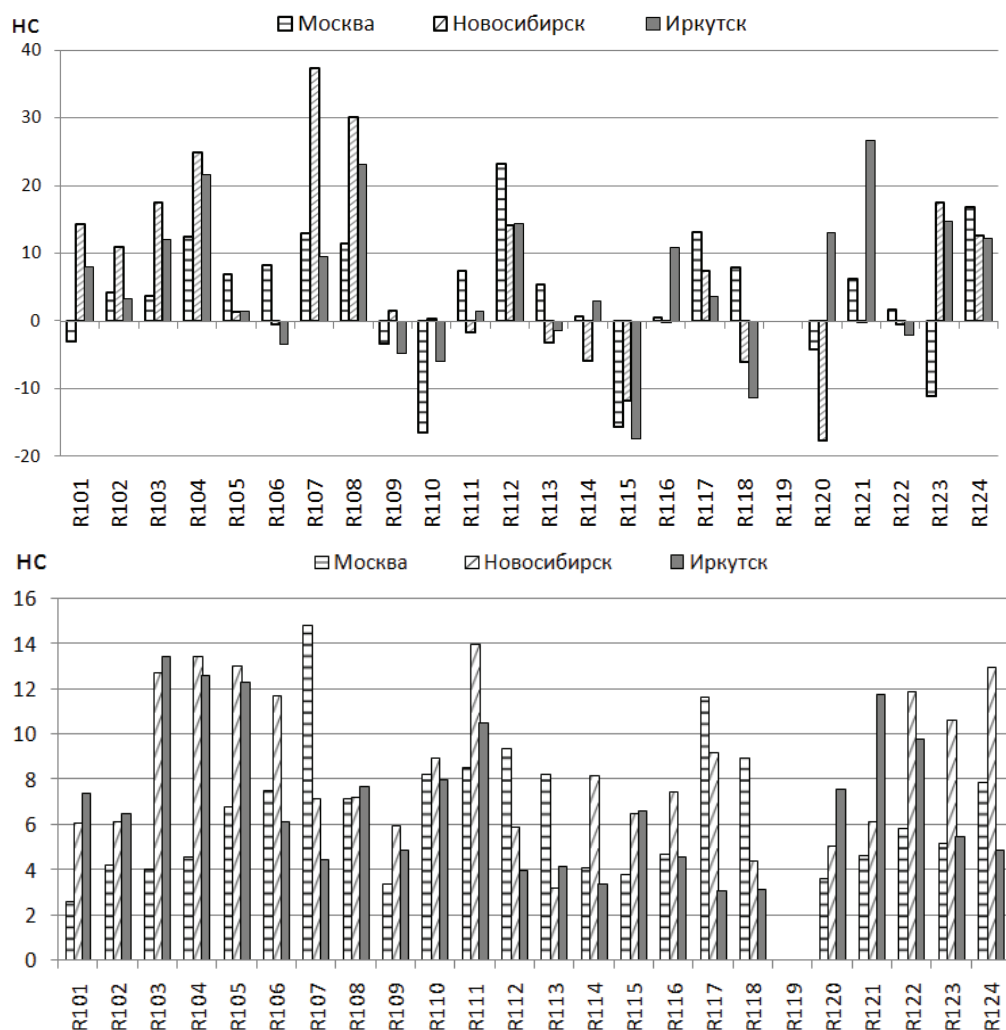


Рис. 3. Диаграммы оценок математических ожиданий и СКО погрешностей представления бортовых шкал времени с помощью частотно-временных поправок (в нс)

Fig. 3. Diagrams of mathematical expectations evaluations and standard deviation of errors of onboard timescale by the time-frequency correction (ns)

Заключение

Предложена методика контроля текущих параметров отклонения бортовых шкал времени навигационных спутников от эталонных шкал по результатам траекторных фазовых измерений в частотных диапазонах ГЛОНАСС L1 и L2. Эффективность оценок положения бортовых шкал достигнута за счет применения технологии PPP.

Сложность реализации методики заключалась в том, что фазовые измерения содержат неоднозначности, а также существует вероятность потери

фазовых циклов и, вследствие этого, появления скачков значений фазы несущей. Однако фазовые измерения обеспечивают увеличение точности оценивания уходов бортовых часов по сравнению с кодовыми.

Результаты контроля бортовых шкал времени орбитальной группировки ГНСС на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты «СНИИМ» позволяют улучшить метрологические характеристики корректирующих поправок, формируемых сетью активных базовых станций Новосибирской области [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ростовцев В.В., Ростовцев В.Н. Увеличение темпов прироста запасов углеводородов с помощью инновационных технологий на примере Омской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 34–39.
2. Краснаярова Н.А., Яценко И.Г., Серебренникова О.В. Распределение вязких и парафинистых нефтей по площади и разрезу отложений юго-востока Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 70–79.
3. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС (Редакция 5.1). – Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. – 74 с.
4. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования // под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др. // под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применения в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 335 с.
8. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.
9. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
10. Управление и навигация искусственных спутников Земли на околокруговых орбитах // М.Ф. Решетнев, А.А. Лебедев, В.А. Бартенева и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 336 с.
11. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. – М.: Радиотехника, 2008. – 328 с.
12. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление // В.В. Малышев, М.Н. Красильщиков, В.Т. Бобронников, О.П. Нестеренко, А.В. Федоров / под ред. В.В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
13. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) (Редакция 3.0). – ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», 2010. – 93 с.
14. Скакун И.О., Митрикас В.В. Сличение шкал времени с использованием сигналов ГНСС в режиме Common View с разрешением фазовых неоднозначностей // Полет. – 2014. – № 1. – С. 50–57.
15. Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km // Journal of Geophysical Research. – 1989. – V. 96. – № B8. – P. 187–203.
16. Melbourne W.G. The case for ranging in GPS based geodetic systems // In Proceeding of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS. – U.S. Dept. of Commerce, Rockville, MD, 1985. – P. 373–386.
17. Wiibbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements // In Proceedings of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS-1985. – Rockville, Maryland, April 15–19, vol. 1, 1985. – P. 403–412.
18. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model / P. Collins, F. Lahaye, P. Hirioux, S. Bisnath // Proceedings of ION-GNSS-2008. – Savannah, Georgia, 16–19 September, 2008. – P. 1315–1322.
19. Алгоритмические пути повышения точности и достоверности частотно-временного обеспечения на основе ГНСС-технологий / Е.А. Ханыкова и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды XII Междунар. конф. В 7 т. Т. 3. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – С. 54–59.
20. Использование псевдодальномерных фазовых измерений для сравнения шкал времени пространственно-разнесённых часов / Е.А. Ханыкова и др. // Современные проблемы радиоэлектроники: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Красноярск, 6–8 мая, 2014 г. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – С. 259–263.
21. Оценивание эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС / А.С. Толстиков и др. // СибОптика-2014: сб. матер. Междунар. науч. конф. В 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГТА, 2014. – С. 8–13.
22. О метрологическом обеспечении сети активных базовых ГНСС-станций Новосибирской области / А.С. Толстиков, Е.А. Ханыкова, А.А. Карауш, А.Р. Безродных // Приборы. – 2014. – № 9 (171). – С. 34–38.

Поступила 25.03.2015 г.

UDC 62–83: 531.3

ON THE ISSUE OF CONTROLLING THE TIME-FREQUENCY PARAMETERS OF GLONASS NAVIGATION FIELD

Aleksandr S. Tolstikov,

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, Karla Marksa Avenue,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: tolstikov@mail.kns.ru

Ekaterina A. Khanykova,

Siberian Research Institute of Metrology, 4, Dimitrova Avenue, Novosibirsk,
630004, Russia. E-mail: hanikovak@mail.ru

For users who work in the field of geology and geodynamics, exploration and production of natural resources, development of oil and gas fields in the areas of coastal shelves, the use of high-precision navigation measurements is the promising direction. The requirements of this circle of special consumers to the accuracy and quality of navigation-time support is constantly increasing. Increase in accuracy and reliability of navigation measurements can be achieved by solving the problem of controlling the parameters of instability of on-board clocks in navigation satellite systems GLONASS, that makes this work relevant.

The main aim of the study is to estimate the instability parameters of onboard clocks GLONASS constellation, determining to a large extent the quality and accuracy of coordinate-time definitions based on satellite navigation technology.

The methods used in the study: method of excepting ionospheric delay by dual-frequency measurements, method for estimating the phase ambiguity, H. Hopfield method to compensate the tropospheric delay, method of statistical estimation of navigation clock setoff in the board satellites by the results of trajectory measurements.

The results. The authors have proposed the method for estimating the setoff of onboard clock of navigation satellite GLONASS on the basis of hardware-software complex of metrological point the State service of time and frequency at the Research Institute of Metrology «SNIIM». The authors pay the main attention to the use of phase pseudo-distance measurements in estimation algorithm as the back-ground information. The typical features of application of such measurements, in particular, the problem of phase ambiguity solution are selected and described. To obtain the high-precision results, the authors used the algorithms for pre-processing the pseudo-distance measurements to reduce the noise level, use of compensatory amendments to ionospheric and tropospheric delays of a navigation signal. The results of the research are the estimates of onboard time scales offset of the GLONASS constellation and statistical characteristics of the scales representation errors using time-frequency corrections. The advantage of the method is the achievement of high precision due to the use of public secondary standard time, frequency and the time scale VET 1–19. The assess obtained by the authors make the basis for controlling time-frequency parameters of GLONASS navigation field, that is one of the tasks of the State Service for metrological point of time and frequency.

The conclusions: The authors propose to use the methods for controlling time-frequency parameters of the GLONASS satellite navigation in order to improve precision characteristics of corrective amendments formed by the network of active base ground stations in Novosibirsk region.

Key words:

Exploration and production of natural resources, development of oil and gas fields, on-board timescales, coordinate-time definition, phase trajectory measurement, GLONASS, phase ambiguity, time-frequency correction, instability of clock generator frequency, GNSS.

REFERENCES

1. Rostovtsev V.V., Rostovtsev V.N. Uvelichenie tempov prirosta uglevodorodov s pomoshchyu innovatsionnykh tekhnologiy na primere Omskoy oblasti [The increase in the rate of growth of hydrocarbon reserves through innovative technologies on an example of Omsk region]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 34–39.
2. Krasnoyarova N.A., Yashchenko I.G., Serebrennikova O.V. Raspredelenie vyazkikh i parafinistnykh neftey po ploshchadi i razmery otlozheniy yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Area and cross-section distribution of viscous waxy oils in deposits located in the southeast of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 70–79.
3. GLONASS Interfeysnyy kontrolnyy dokument (Versiya 5.1) [GLONASS Interface Control Document (Version 5.1)]. *Rossiiskiy nauchno-issledovatel'skiy institut kosmicheskogo priborostroeniia*, 2010. 74 p.
4. Perov A.I., Kharisov V.N. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p.
5. Shebshaevich V.S. Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite radio navigation system]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1993. 408 p.
6. Antonovich K.M. *Ispolzovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite navigation systems in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr, 2005. 334 p.
7. Genike A.A., Pobedinskiy G.G. *Globalnye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopologeniya i ikh primeneniya v geodezii* [Global satellite positioning system mestoplozheniya and their applications in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr Publ., 2004. 335 p.
8. Yatsenkov V.S. *Osnovy sputnikovoy navigatsii. Sistemy GPS NAVSTAR i GLONASS* [Fundamentals of satellite navigation. System of GPS NAVSTAR and GLONASS]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2005. 272 p.
9. Oduan K., Gino B. *Izmerenie vremeni. Osnovy GPS* [Time measurement. Basics of GPS]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2002. 400 p.
10. Reshetnev M.F. *Upravlenie i navigatsiya iskusstvennykh sputnikov Zemli na okolo krugovykh orbitakh* [Control and navigation of satellites on circular orbits]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 336 p.
11. Povalyaev A.A. *Sputnikovye radionavigatsionnye sistemy: vremya, pokazaniya chasov, formirovaniye izmereniy i opredeleniye ot-nositelnykh koordinat* [Satellite navigation system: time, clock, formation measurements and determination of relative coordinates]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2008. 328 p.
12. Malyshev V.V., Krasilshchikov M.N., Bobronnikov V.T., Nesterenko O.P., Fedorov A.V. *Sputnikovye sistemy monitoringa. Analiz*

- liz, sintez i upravlenie* [Satellite Monitoring System. Analysis, synthesis and management]. Moscow, MAI Press, 2000. 568 p.
13. Interfeysny kontrolny dokument GLONASS. Sistema vysokotochnogo opredeleniya efemerid i vremennykh popravok (SVO-EVP) (Redaktsiya 3.0) [GLONASS Interface Control Document. The system of high-precision ephemeris and time corrections (SVOEVP) (Version 3.0)]. Scientific and Production Corporation «Precision Instrumentation Systems», 2010. 93 p.
14. Skakun I.O., Mitrikas V.V. Slichenie shkal vremeni s ispolzovaniem signalov GNSS v pezhime Common View s razresheniem fazovykh neodnoznachnostey [Comparison of time scales using GNSS signals in Common View mode with a resolution of ambiguities]. *Polet*, 2014, no. 1, pp. 50–57.
15. Blewitt G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research*, 1989, vol. 96, no. B8, pp. 187–203.
16. Melbourne W.G. The case for ranging in GPS based geodetic systems. In *Proc. of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS*. U.S. Dept. of Commerce, Rockville, MD, 1985. pp. 373–386.
17. Wiibbena G. Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements. In *Proc. of the First Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Positioning with GPS-1985*. Rockville, Maryland, April 15–19, vol. 1, 1985. pp. 403–412.
18. Collins P., Lahaye F., Hiaroux P., Bisnath S. Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model. *Proc. of ION-GNSS-2008*. Savannah, Georgia, 16–19 September, 2008. pp. 1315–1322.
19. Khanykova E.A. Algoritmicheskie puti povysheniya tochnosti i dostovernosti chastotno-vremennogo obespecheniya na osnove GNSS-tehnologii [Algorithmic ways to improve the accuracy and reliability of time-frequency software-based GNSS technology zone]. *Trudy XII Mezhdunarodnoy konferentsii. Aktualnye problemy elektronnoy priborostroeniya* [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings]. Novosibirsk, October 2–4, 2014. Vol. 7, no. 3, pp. 54–59.
20. Khanykova E.A. Ispolzovanie psevdodalnomernykh fazovykh izmereniy dlya sravneniya shkal vremeni prostranstvenno-raznennykh chasov [Using pseudo-distance phase measurements for comparison of time scales of space-spaced clocks]. *Sovremennye problemy radioelektroniki: materialy* [Modern problems of radio electronics]. Krasnoyarsk, May 6–8, 2014. pp. 259–263.
21. Tolstikov A.S., Khanikova E.A., Karaush A.A. Otsenivanie efemeridno-vremennykh parametrov orbitalnoy gruppirovki GLO-NASS [Evaluation of ephemeris and time parameters of GLO-NASS constellation]. *SibOptika-2014. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [SibOptika-2014. Proc. of the International scientific conference]. Novosibirsk, April 8–18, 2014. Vol. 2, pp. 8–13.
22. Tolstikov A.S., Khanikova E.A., Karaush A.A., Bezrodnykh A.R. O metrologicheskom obespechenii seti aktivnykh bazovykh GNSS-stantsii Novosibirskoy oblasti [On metrological support of active GNSS base stations network in Novosibirsk Region]. *Pribo-ry*, 2014, no. 9 (171), pp. 34–38.

Received: 25 March 2015.

УДК 004.738:004.45

МОБИЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

Самойленко Борис Игоревич,

студент кафедры автоматике и компьютерных систем
Института кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: boris-1991@mail.ru

Вичугов Владимир Николаевич,

канд. техн. наук, заведующий лабораториями кафедры автоматике
и компьютерных систем Института кибернетики Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vlad@tpu.ru

Вичугова Анна Александровна,

канд. техн. наук, доцент кафедры автоматике и компьютерных систем
Института кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vichugovaaa@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением беспроводных сетей и необходимостью анализа степени их воздействия на человека, что относится к прикладным задачам геоэкологии и геоинформатики. Исследуется плотность электромагнитного загрязнения окружающей среды посредством определения количества источников излучения и их радиуса действия.

Цель работы: поиск и анализ информации об электромагнитном излучении, исходящем от окружающих беспроводных сетей различных типов: сотовой связи, Wi-Fi и Bluetooth, с использованием разработанного программного обеспечения для мобильных устройств на платформе Android.

Методы исследования: методы и средства проектирования и разработки программного обеспечения, геоинформационных систем, формального описания информационных процессов и систем, математические методы триангуляции, многомерной оптимизации и фильтрации сигналов, закон обратных квадратов, экспериментальные измерения.

Результаты. Поставлена и решена задача поиска и анализа информации об электромагнитном излучении, исходящем от окружающих беспроводных сетей различных типов: сотовой связи, Wi-Fi и Bluetooth. Описаны используемые методы и средства, технологии программирования и математические основы разработанного мобильного приложения на платформе Android. Рассмотрены вопросы приема, триангуляции и фильтрации сигналов излучения. Приведены результаты экспериментальных измерений для определения калибровочного коэффициента. Выполнены расчеты мощности источника излучения, а также радиуса действия беспроводных сетей анализируемых типов. Разработанное программное приложение для мобильных устройств протестировано в различных районах города Томска. Описаны функциональные возможности разработанного программного обеспечения, приведены скриншоты интерфейса. На основании данных, полученных в результате тестирования, сделаны выводы относительно возможного влияния беспроводных сетей на здоровье людей.

Ключевые слова:

Геоэкология, геоинформатика, мобильное приложение, беспроводные сети, триангуляция сигнала.

Введение

В дополнение к пользе функционального назначения, повсеместное распространение беспроводных сетей в среде обитания современного человека приводит к повышению уровня электромагнитного неионизирующего излучения, которое негативно влияет на здоровье людей. Таким образом, под влиянием данного антропогенного фактора изменяется естественное состояние экосистемы. Всемирная организация здравоохранения и Международное агентство по изучению рака классифицировали радиоизлучение сотовых телефонов как потенциальный канцероген, определив его в группу 2B – «возможно канцерогенных для человека» факторов [1].

В России, как и в ряде других стран, введены нормы, регулирующие максимально допустимую плотность радиоизлучения на единицу площади [2–4]. Однако, в связи с невозможностью точного прогнозирования последствий этого излучения на организм человека, данные нормы носят исключительно предупредительный характер [5]. Согласно [6], использование мобильных телефонов в развитых странах варьируется в среднем от 0,6 до более чем 1,2 единицы на душу населения. В России этот показатель выше, чем в Европе, и составляет 1,3. Поэтому вопрос сбора и предоставления данных об излучении от беспроводных сетей является своевременным и актуальным. Автоматизация этого процесса относится к прикладным задачам геоинформатики и разработки программного обеспечения.

Постановка задачи

Нестационарный (в плане географического местоположения) характер рассматриваемой проблемы накладывает определенные требования к методам и средствам ее решения. В частности, техническое устройство для отображения данных об обнаруженных беспроводных сетях должно быть мобильным и широко распространенным. Эти качества сочетает в себе современный сотовый телефон или другое мобильное устройство (планшетный компьютер, смартфон) с возможностью установки дополнительного программного обеспечения (ПО) для поиска, анализа и представления данных об окружающих беспроводных сетях.

Выполненный анализ рынка мобильных приложений показал отсутствие подобного ПО. Поэтому была поставлена цель создания мобильного приложения для поиска и анализа информации о беспроводных сетях и следующих их параметрах: тип, текущая мощность сигнала (в данной точке), расстояние до источника и радиус действия. В связи с пространственной ориентацией объекта анализа целесообразно выполнять географическое позиционирование источника и приемника излучения, т. е. показывать на карте их местонахождение и радиус действия сигнала.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выбор платформы и среды разработки приложения для мобильных устройств, поддерживающих взаимодействие с радиомодулями различных беспроводных сетей и сервисами определения текущего географического местоположения;
- организация сбора данных о беспроводных сетях, в зоне действия которых находится мобильное устройство;

- разработка алгоритмов определения расстояния до источника излучения по текущей мощности сигнала с учетом влияния искажений и помех;
- реализация разработанных алгоритмов в виде ПО для мобильного устройства.

Типы анализируемых беспроводных сетей

Наиболее распространенными в современной городской среде являются следующие типы беспроводных сетей: Wi-Fi, Bluetooth и сети сотовой связи. Последние принято делить по поколениям (табл. 1), причем некоторые из них сегодня считаются устаревшими и практически не используются [7, 8].

Поскольку сотовые сети поколения 1G уже не используются, а сети 4G на настоящее время еще не получили повсеместного распространения, в данной работе они не рассматриваются [7, 8]. Таким образом, объектом анализа являются следующие типы беспроводных сетей: Wi-Fi (на базе стандарта IEEE 802.11), Bluetooth (3 и 4 версии) и сети сотовой связи поколений 2G и 2,5G (на базе стандарта GSM: GPRS, EDGE и на базе стандарта CDMA: CDMA, 1xRTT), а также 3G и 3,5G (на базе стандарта GSM: UMTS, HSPA, HSUPA, HSDPA, HSPA+ и на базе стандарта CDMA2000: CDMA200, EVDO).

Методы и средства (выбор программных технологий)

Начальным этапом разработки мобильного приложения является выбор платформы – операционной системы (ОС), под управлением которой функционирует устройство. В настоящее время на рынке ОС для мобильных устройств можно выделить пять основных лидеров: Android, iOS, Win-

Таблица 1. Поколения мобильной телефонии и их особенности

Table 1. Generations of mobile telephony and their features

Поколение Generation	1G	2G	2,5G	3G	3,5G	4G
Начало разработок Start of development	1970	1980	1985	1990	<2000	2000
Реализация Implementation	1984	1991	1999	2002	2006–2007	2008–2010
Сервисы Services	аналоговый стандарт, речевые сообщения analog standard, voice messages	цифровой стандарт, поддержка коротких сообщений (SMS) digital standard, short message support (SMS)	большая ёмкость, пакетная передача данных high capacity, packet data transmission	повышенная ёмкость, увеличение скорости передачи данных extended capacity, increase of data transmission rate	увеличение скорости передачи данных increase of data transmission rate	повышение ёмкости, IP-ориентированность, поддержка мультимедиа increase of capacity, IP-direction, multimedia support
Скорость передачи Transmission rate	1,9	9,6–14,4	115–384	2	3–14	100 Мбит/с (Mb/s) – 1 Гбит/с (Gb/s)
Стандарты Standards	AMPS, TACS, NMT	TDMA, CDMA, GSM, PDC	GPRS, EDGE (2.75G), 1xRTT	WCDMA, CDMA2000, UMTS	HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+	LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), WirelessMAN-Advanced

dows Phone/Windows Mobile и Linux [9], среди которых превалирует ОС Android.

На рынке средств разработки ПО для мобильных устройств существуют решения для создания приложений, функционирующих под управлением различных ОС. Однако подобный переход к мультиплатформенности еще не стал массовым и не является основным критерием поиска программных технологий для достижения поставленных в данной работе задач.

В дополнение к поддержке и регулярным обновлениям ОС для мобильных устройств их производители предоставляют специальный документированный комплект средств разработки ПО, называемый SDK (от англ. Software Development Kit). Например, для Android компания Google предлагает Android SDK, для Windows Phone корпорация Microsoft предоставляет Windows Phone SDK, iOS сопровождается iOS SDK от фирмы Apple.

Таким образом, важным критерием отбора платформы разрабатываемого мобильного приложения было наличие развитого набора средств SDK. В соответствии с поставленными задачами относительно поиска и анализа информации о беспроводных сетях, определяющими факторами при выборе SDK являлись следующие:

- наличие в SDK/NDK средств для сбора и обработки данных с радиомодулей GSM/CDMA, Wi-Fi, Bluetooth;
- наличие документации и поддержки для SDK;
- высокий уровень распространения платформы на рынке мобильных устройств;
- стоимость устройств с установленной платформой;
- предполагаемая перспективность платформы.

Из выбора исключена платформа Blackberry, так как она имеет невысокую долю на рынке и уступает место динамично развивающейся ОС Windows Phone от Microsoft. Распространение последней платформы увеличивается за счёт устройств от Nokia, HTC и других производителей. Однако текущие функциональные возможности Windows Phone SDK не содержат средств для определения уровня сигнала беспроводных сетей и потому исключают эту платформу из доступных к применению. Apple iOS не рассматривалась по причине высокой стоимости мобильных устройств, работающих на ней.

Таким образом, выбор платформы Android для разработки мобильного приложения поиска и анализа излучения от беспроводных сетей обусловлен следующим факторами:

- наличие SDK, имеющей необходимые средства для работы с сигналами сетей, начиная с версии 15 (соответствует ОС Android 4.0.3);
- наличие средств геопозиционирования: модуля GPS, средств соединения с Интернет для доступа к картам Google Maps и увеличения точности;
- подробная документация от разработчиков Android и в сети Интернет;

- лидирующая доля на рынке разнообразных мобильных устройств (смартфоны, планшетные компьютеры и т. д.).

В результате работы создано мобильное приложение WirelessScanner для платформы Android 4.0.3 и выше. Разработка выполнялась при помощи: Android SDK API level 15, Google Maps for Android API v2, Google Location API, IDE Eclipse Android Tools и Android Studio (IntelliJ IDEA). Тестирование выполнялось на следующих мобильных устройствах: смартфоны ZTE V880E и HTC Desire C, планшетный компьютер Google Nexus 9.

Геопозиционирование

Задача определения местоположения, т. е. геопозиционирования, решается двумя способами: встроенными средствами приемника сигнала (мобильного устройства – телефона, планшета и пр.) и с помощью веб-сервиса Google. В первом случае в рамках выбранной платформы для разработки мобильного приложения используются решения Android SDK. Второй способ предполагает доступ мобильного устройства в Интернет и обращение к сервисам Google.

Google Location APIs является частью Google Play Services и позволяет получить данные о текущем географическом положении мобильного устройства за счет триангуляции по значениям мощностей сигналов от источников близлежащих беспроводных сетей. Применение подобной технологии позволяет значительно увеличить точность определения текущего местоположения в местах с высокой плотностью беспроводных сетей.

При помощи Google Location APIs становится возможным определение положения устройств, в которых отсутствует модуль GPS [10]. Точность геопозиционирования внутри здания бывает выше, чем за его пределами, из-за наличия большого количества беспроводных сетей. Однако работа Google Location APIs основана на обращении к встроенным средствам мобильного устройства, доступным через Android SDK. Поэтому использование Google Location APIs неэффективно при определении местоположения в местах, где количество беспроводных и мобильных сетей мало.

Использование встроенных средств мобильного устройства редко позволяет добиться высокой точности (менее 50 м), особенно при отключении функции определения координат по сети в настройках ОС Android. В этом случае необходимо использовать модуль GPS, запуск которого может требовать длительного времени.

Технологии программирования

Выбранные средства разработки Android SDK позволяют получить данные об окружающих беспроводных сетях путем обращения к модулям телефонии, Wi-Fi и Bluetooth мобильного устройства. В общем случае для решения этой задачи следует использовать специальные обработчики событий, которые подписываются на обновления со-

стояния объекта анализа и следят за ними с помощью так называемых широкополосных приемников – специальных программных компонентов.

Событие изменения сигнала используется для повторного чтения информации об окружающих вышках сотовой связи. Android SDK позволяет получать информацию только о той сети сотовой связи, в которой мобильное устройство зарегистрировано в данный момент путем использования SIM-карты. Информация о сети включает следующие данные: Location Area Code (LAC) и номер соты для сотовых сетей сотовой связи второго поколения, PSC-код и для сетей третьего поколения [7].

Принцип действия модулей Bluetooth и Wi-Fi отличается от принципа действия модуля телефонии. Если модуль телефонии получает информацию о доступных сотах сети постоянно, то модули Bluetooth и Wi-Fi следует инициализировать для поиска сетей. Для этого необходимо использовать переопределенный широкополосный приемник BroadcastReceiver, который подключается к любому контексту и использует фильтры намерения (IntentFilter) для определения событий, на которые необходимо отреагировать.

Wi-Fi и Bluetooth модули начинают сканирование сетей и прекращают его, генерируя глобальное событие, видимое всем подключенным к ним широкополосным приемникам. Последние, помимо сбора информации, обеспечивают накопление и обработку данных о найденных сетях.

Математические основы алгоритмического обеспечения

Задача определения расстояния от текущего местоположения до источника излучения по мощности сигнала в данной точке является базовой и не зависит от типа беспроводной сети. Согласно закону обратных квадратов, мощность сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния. Поэтому расстояние до источника излучения определяется формулой:

$$a = \sqrt{\frac{k}{R}}, \quad (1)$$

где k – калибровочный коэффициент; R – мощность сигнала.

Выражение (1) предполагает известную мощность сигнала в абсолютных величинах (ватт). Однако практически измерение мощности выполняется в относительной логарифмической величине дБм (децибелл на милливатт). Поэтому выражение (1) трансформируется в следующую формулу:

$$a = 10^{\frac{R_{dBm} - s}{10k}}, \quad (2)$$

где R_{dBm} – мощность (дБм); s – мощность в текущей точке, измеренная на расстоянии 1 м от источника излучения (дБм); k – калибровочный коэффициент.

Выражение (2) показывает экспоненциальную зависимость двух искомых переменных друг от друга: расстояния до источника излучения и мощ-

ности сигнала в точке измерения [11]. Поэтому вычисление местоположения источника излучения производится относительно известных точек. Таким образом, для определения координат источника сигнала необходимо решить задачу триангуляции. При этом расстояние до источника излучения определяется по трём (в двумерном случае) или четырём (в трёхмерном случае) и более точкам, в которых измерена мощность согласно формуле (2).

Геометрически (в двумерном случае) задача представляет собой нахождение точки S , которая расположена на минимальном расстоянии от центров окружностей $A_1, A_2, \dots, A_n$, $n \geq 3$, с радиусом, равным предполагаемым расстояниям до источника (рис. 1). В трехмерном пространстве, где $n \geq 4$, каждая точка, помимо координат широты и долготы, имеет также значение высоты.

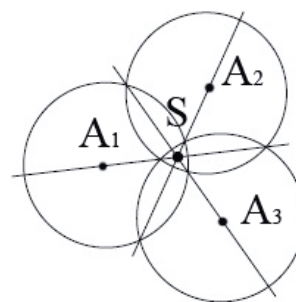


Рис. 1. Двумерная триангуляция источника S

Fig. 1. Two-dimensional triangulation of the source S

Таким образом, по методу наименьших квадратов [12], необходимо решить задачу многомерной минимизации функции суммы расстояний от всех имеющихся точек:

$$\sum_{i=1}^n ((x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 - A_i^2)^2 \rightarrow \min(x_s, y_s), \quad (3)$$

где $(x_i; y_i)$ – координаты i -й точки, $1 \leq i \leq n$.

Для решения минимизации функции по выражению (3) был использован метод многомерной оптимизации Марквардта, представляющий собой комбинацию методов градиентного спуска и метода Ньютона. Метод Марквардта имеет высокую сходимость за счет двунаправленного решения: с одной стороны движение происходит в сторону, противоположную градиенту функции в точке, удаленной от точки минимума, а с другой – направление эффективного поиска в окрестностях точки минимума определяется по методу Ньютона. Метод Марквардта был использован для первичной триангуляции источника, последующей минимизации ошибки и определения радиуса излучения.

Согласно выражению (2), вычисление предполагаемого расстояния до источника излучения зависит от калибровочного коэффициента, при котором результирующее расстояние будет соответствовать действительности при допущении, что для каждого типа анализируемых беспроводных сетей (Wi-Fi, Bluetooth, сети сотовой связи) мощности излучателей являются одинаковыми.

Были проведены измерительные эксперименты получения значений мощностей, соответствующих значениям расстояний до источника излучения. При этом для каждого выбранного расстояния выполнялось пять измерений, из которых выбиралось среднее арифметическое. Измерения производились с интервалом 5 секунд при последовательном размещении двух разных смартфонов: излучателя и измерителя с помощью встроенного программно-аппаратного обеспечения типового мобильного устройства. Пример экспериментальных измерений для сети типа Bluetooth приведен в табл. 2.

Таблица 2. Измерения мощностей сигнала сети Bluetooth на различных расстояниях

Table 2. Measurement of a signal of Bluetooth network at different distances

Расстояние, м Distance, m	0,05	0,3	0,6	1,0	1,5	2,0
Мощность, дБм Power, dBm	-38	-38	-45	-60	-68	-78
	-40	-44	-46	-62	-73	-75
	-36	-46	-46	-55	-66	-73
	-36	-38	-50	-51	-67	-78
Средняя мощность, дБм Average power, dBm	-38	-39	-41	-57	-62	-75
	-38,0	-41,0	-45,6	-57,0	-67,2	-75,8

Согласно [5], для анализируемых типов сетей значение мощности сигнала, как правило, варьируется в диапазоне от -30 до -113 дБм. Анализ результатов измерительных экспериментов (табл. 2) показывает, что среднее значение мощности сигнала s , измеренное на расстоянии одного метра от источника излучения, равно -57 дБм.

Преобразуя формулу (2), получаем выражение для вычисления калибровочного коэффициента k как среднего арифметического коэффициентов для каждого полученного показателя мощности:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R_i - s}{10 \log a_i}}{n}, \quad (4)$$

где n – число групп измерений; R_i – средняя мощность сигнала в данной точке (дБм); a_i – расстояние от источника сигнала до данной точки (м).

В результате полученный коэффициент $k = -3,61$. Подставляя его и значение $s = -57$ в формулу (2), получаем функцию расчёта расстояния по мощности сигнала:

$$a_1(R_{dBm}) = 10^{\frac{R_{dBm} + 57}{-36,1}}. \quad (5)$$

Дальнейшая триангуляция расстояния до источника излучения и оптимизация калибровочных коэффициентов состояла из следующих этапов:

- 1) минимизация функции (3) по полученным входным данным методом Марквардта;
- 2) если точек больше n , то для каждой точки вычисляется значение ε_i – отклонение расстояния

до вычисленного в ходе шага 1 источника от измеренного ранее:

$$\varepsilon_i = |(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 - A_i^2|, \quad (6)$$

где x_s и y_s – координаты источника, найденные при триангуляции, $n=3$ для двумерного случая задачи, $n=4$ для трёхмерного случая. После этого происходит отбрасывание точки с наибольшим значением ε_i и переход к шагу 1, иначе – переход к шагу 3. Для триангуляции используется 15 лучших точек;

- 3) используя полученные значения x_s и y_s как константы и описывая значения расстояния A_i в выражении (3) через формулы (2), (5), (6), формулируем задачу минимизации функции относительно калибровочных коэффициентов:

$$\sum_{i=1}^n \left((x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 - 10^{\frac{2(R_i - s)}{10k}} \right)^2 \rightarrow \min(s, k), \quad (7)$$

где s и k – калибровочные коэффициенты, начальные значения которых соответствуют предустановленным значениям для данного типа сети. После завершения минимизации функции (7) методом Марквардта калибровочные коэффициенты сети обновляются.

Таким образом, входными данными для триангуляции служат координаты и высоты точек, значения сигналов в этих точках и калибровочные коэффициенты сети. Триангуляция источника повторяется в том случае, если обновляется состав точек сети или значений сигналов в них. Для решения матричных уравнений, присутствующих в алгоритме метода Марквардта, используется библиотека JAMA [13]. Вычисление производных первого и второго порядков в методе Марквардта реализовано в качестве отдельных функций.

Для трёхмерной триангуляции требуется четыре точки, однако для ускорения процесса при наличии трёх точек предварительно выполняется двумерная триангуляция. Это обусловлено тем, что в реальности значение высоты редко существенно влияет на координаты широты и долготы источника, особенно в случае сетей сотовой связи.

Для триангуляции источника сети важно, чтобы при сканировании сетей было сохранено как можно меньше точек, содержащих ложные или искажённые данные. Встроенными средствами мобильного устройства и Android SDK невозможно установить качество получаемого сигнала, поскольку обработка данных выполняется программным образом. Также возможны искажения в геопозиционировании мобильного устройства [14], что следует учесть при сборе точек.

Первый этап минимизации и сглаживания искажения исходных данных состоит в определении минимальной точности геопозиционирования для каждой группы сети. Соответственно, чем больше предполагаемая зона покрытия для данной группы сетей, тем менее существенно значение искажений в измерениях местоположения и тем выше показатели точности. Определены следующие значе-

ния точности для расчета расстояний до источника беспроводной сети: 100 м для сетей сотовой связи, 30 м для Wi-Fi и 15 м для Bluetooth.

Далее необходимо снизить воздействие случайных помех. Вследствие неоднородности окружающей среды для одной и той же географической точки могут быть получены совершенно разные значения сигнала сети. В таком случае выполняется обновление параметров уже существующей точки с вычислением среднего арифметического значения всех измерений сигналов в ней.

Однако возможен случай, когда точки одной сети находятся очень близко друг к другу, но определяются как разные по причине отличия их географических координат. Более того, из-за искажений геопозиционирования точки практически никогда не будут совпадать, даже находясь в нескольких сантиметрах друг от друга. В таком случае принцип обновления существующей точки не имеет смысла и целесообразно объединять такие точки [15–19]. Для этого используется метод, принцип действия которого изображён на рис. 2.

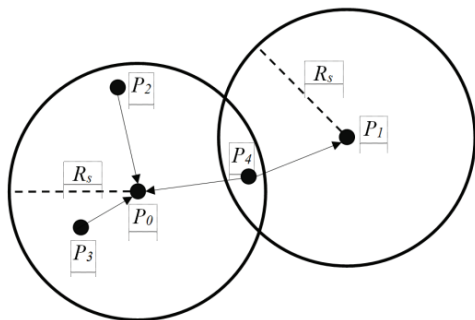


Рис. 2. Объединение близкорасположенных точек

Fig. 2. Join of nearby points

Для каждого типа сетей было определено значение радиуса объединения R_s . Если новая точка P_i находится в пределах радиуса одной или большего количества уже сохранённых точек P_j , то, вместо сохранения новой точки, будут обновлены значения сигналов существующих точек, в радиус объединения которых попадает новая. Для случая, представленного на рис. 3, в списке точек будут сохранены только P_0 и P_1 . Значения сигналов в P_0 будут обновлены в зависимости от значений сигналов в точках P_2 , P_3 и P_4 , а значение сигнала в P_1 – в зависимости от значения в точке P_4 .

Радиус объединения выбран так, чтобы предотвратить накопление лишних данных и сохранить достаточно точек для дальнейшей триангуляции источника. Таким образом, для сетей малого радиуса действия (Wi-Fi и Bluetooth) целесообразно установить небольшой радиус объединения. И наоборот, для сетей сотовой связи имеет смысл установить большее значение, поскольку вероятность резкого изменения мощности сигнала на малом расстоянии открытой местности невелика. Определены следующие значения радиусов объединения точек для рассматриваемых типов беспроводных

сетей: 30 м для сетей сотовой связи, 5 м для сетей Wi-Fi и 1 м для сетей Bluetooth.

Программная реализация

Мобильное приложение включает несколько модулей (управляющих объектов), реализующих функции поиска и анализа беспроводных сетей:

- TelephonyDevice: отвечает за взаимодействие с модулем телефонии;
- WiFiDevice: отвечает за взаимодействие с модулем Wi-Fi;
- BluetoothDevice: отвечает за взаимодействие с модулем Bluetooth;
- LocationDevice: абстрактный класс взаимодействия с одним из сервисов местоположения, реализациями которого могут быть:
 - OnBoardLocation – взаимодействие со встроенными в ОС Android средствами определения местоположения (модуль GPS, геопозиционирование по координатам);
 - GoogleLocation – взаимодействие с сервисом Google Location.

В соответствии с заявленными функциональными требованиями к мобильному приложению поиска и анализа беспроводных сетей, определено шесть вариантов использования приложения, представленных на рис. 3 в виде соответствующей UML-диаграммы [20]. Графический интерфейс является основным и единственным средством взаимодействия пользователя с мобильным приложением в ОС Android [21] (рис. 4, а).

Реализация представленных на рис. 3 вариантов использования выполнена в рамках графических окон-вкладок с возможностью переключения между ними. Раздел *Состояние* содержит элементы интерфейса, позволяющие получить доступ к текущему состоянию приложения и параметрам процесса сканирования беспроводных сетей. Также отображаются данные геопозиционирования: текущие координаты, высота и точность. Выбор типа сети для поиска доступен в режиме реального времени. При нажатии на запись выводится окно с дополнительной информацией о выбранной сети (рис. 4, б).

Раздел *Карта* представляет собой визуализацию покрытия найденных беспроводных сетей, включая данные об источниках и зонах покрытия (рис. 4, в). Каждая найденная сеть отмечена окружностью, цвет которой завит от типа сети: желтым отмечены сотовые сети 2G, красным – 3G, зеленым – Wi-Fi, синим – Bluetooth. В разделе *Анализ* приводится перечень сетей, сохраненных в течение сеанса работы приложения. Для управления настройками приложения используется раздел *Настройки*.

Заключение

В рамках поставленной задачи геоинформатики в результате работы создано мобильное приложение на платформе Android для визуализации

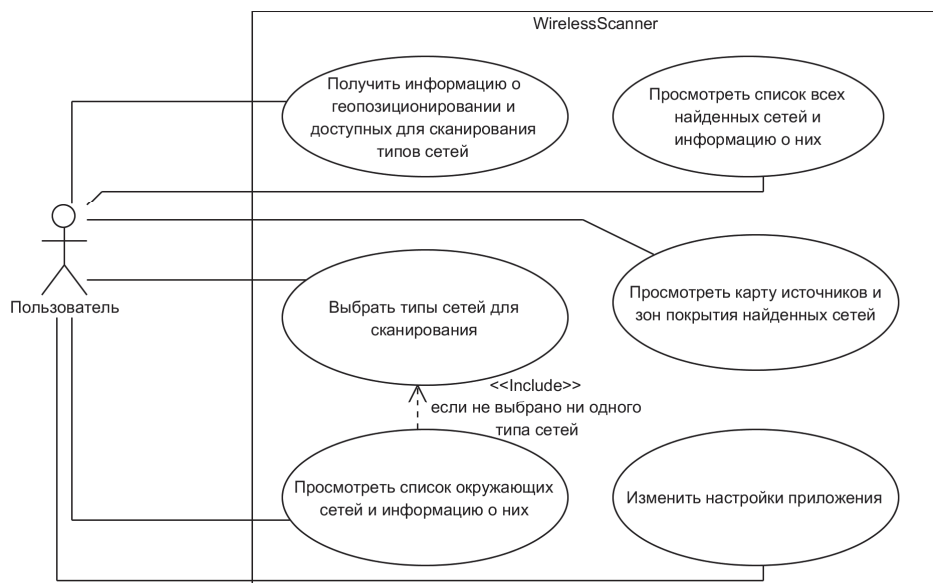


Рис. 3. UML-диаграмма вариантов использования приложения

Fig. 3. UML-diagram of using applications

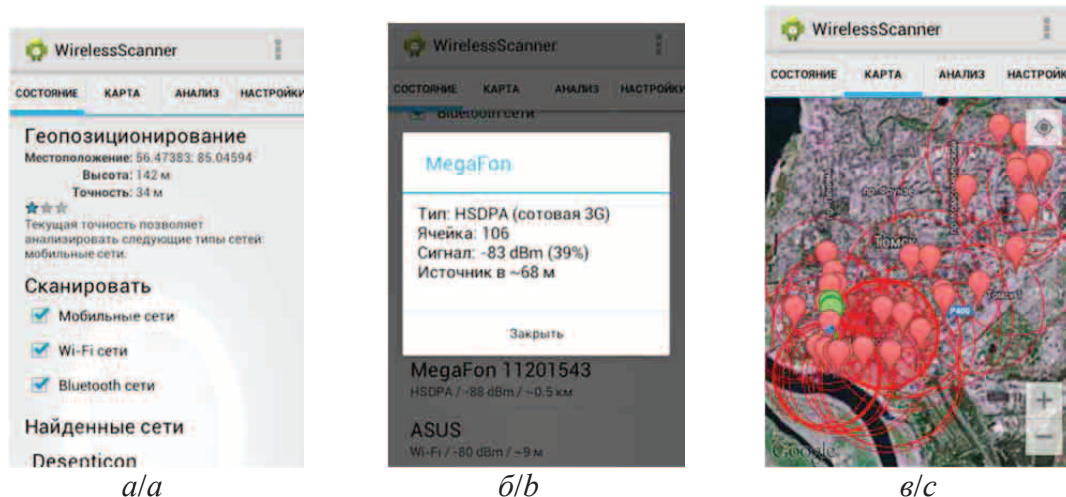


Рис. 4. Интерфейс мобильного приложения: а) внешний вид приложения после запуска; б) информация о соте № 106 сети MegaFon; в) отображение источников излучения и радиусов их действия на карте

Fig. 4. Interface of the mobile application: a) outside view of the application after launch; b) information on cell № 106 of MegaFon network; c) displaying radiation sources and radius of their effect on a map

покрытия беспроводных сетей. Приложение позволяет по усмотрению пользователя и при наличии соответствующих модулей оборудования в мобильном устройстве проводить сбор данных по окружающим сетям сотовой связи 2G и 3G, а также Wi-Fi и Bluetooth. Выполняется триангуляция источника и оценка зоны покрытия излучения. Полученные данные о действующих беспроводных сетях и плотности электромагнитного загрязнения представляются пользователю в наглядном виде посредством размещения объектов на карте, представленной сервисом Google Maps.

Полученная с помощью разработанного мобильного приложения информация об источниках электромагнитного излучения в ближайшем ради-

усе действия в разных районах г. Томска показала достаточно высокую плотность покрытия данной территории беспроводными сетями. Поэтому возникает вопрос о влиянии этого факта на здоровье горожан. Согласно [1–6], вред радиосигнала зависит от его частотного диапазона. Например, обыкновенный радиоприёмник работает в диапазоне 50–150 МГц, военные радиостанции – в диапазоне до 500 МГц, сотовые телефоны в сетях 4G – около 1900 МГц. Частота функционирования сетей Wi-Fi составляет 2,4–5 ГГц.

Разумеется, любой радиосигнал по природе оказывает влияние на атомы и молекулы, в том числе и на живые клетки организма. Однако для нанесения ощутимого вреда здоровью частотный ди-

апазон излучаемого сигнала должен колебаться с постоянной амплитудой, быть сфокусированным на объект и воздействовать на него постоянно и целенаправленно.

На практике высокая частота излучения сетей Wi-Fi рассеивается и не оказывает ощутимого влияния на организм, даже при наличии у точки доступа большого количества антенн, которые работают в различных диапазонах и раздают сигнал на принимающие устройства (телефон, компьютер).

Кроме того, накопленных статистических данных за двадцатилетнюю историю повсеместного распространения беспроводных сетей пока недостаточно для однозначного формулирования степени вреда от различных источников излучения. Таким образом, разработанное мобильное приложение решает, в первую очередь, задачу визуализации покрытия беспроводных сетей и отображения радиуса их действия, не фокусируясь на их влиянии на живой организм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотовый телефон и рак мозга: есть ли связь? // RevelMob. 2015. URL: <http://www.revelmob.com/ru/%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%B3/сотовый-телефон-и-рак-мозга-есть-ли-связь> (дата обращения: 28.04.2015).
2. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055 96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)». – М: Минздрав России, 1996. – 10 с.
3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.8./2.2.4.019–94 «Временные допустимые уровни воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи». – М: Минздрав России, 1994. – 12 с.
4. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях». – М: Минздрав России, 2003. – 10 с.
5. Дунаев В.Н. Электромагнитные излучения и риск популяционному здоровью при использовании средств сотовой связи // Гигиена и санитария. – 2007. – Вып. 6. – С. 56–57.
6. The shocking demographics of cell phone use // Visually. URL: <http://visual.ly/shocking-demographics-cell-phone-use> (дата обращения: 10.02.2015).
7. Что такое 1G, 2G, 3G, 4G и все что между ними // Хабрахабр. URL: <http://habrahabr.ru/post/112535/> (дата обращения: 10.02.2015).
8. Поколения мобильной телефонии // Википедия – свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Поколения_мобильной_телефонии (дата обращения: 10.02.2015).
9. Рынок мобильных ОС в 2012 году по версии IDC // 3DNews. Daily Digital Digest. URL: <http://www.3dnews.ru/news/641673> (дата обращения: 10.02.2015).
10. HYPERLINK «<https://developers.google.com/maps/documentation/webservices?hl=ru>» Веб-службы API Google Карт // Google Developers. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/?hl=ru> (дата обращения: 10.02.2015).
11. Bardwell J. Converting signal strength percentage to dBm values. URL: [https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fmadwifi-project.org%2Fattachment%2Fwiki%2FUserDocs%2FRSSI%2FConverting_Signal_Strength.pdf%3Fformat%3draw&ei=HplAVZj-BsqxygOpg4DQBw&usq=AFQjCNG_jtFJ116Hnr1OU3KxHFVIAjAXQ&sig2=tpV3x0jQjuFZG4wG5n_LKQ&bvm=bv.91665533,d.bGQ&cad=rjt](https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fmadwifi-project.org%2Fattachment%2Fwiki%2FUserDocs%2FRSSI%2FConverting_Signal_Strength.pdf%3Fformat%3Draw&ei=HplAVZj-BsqxygOpg4DQBw&usq=AFQjCNG_jtFJ116Hnr1OU3KxHFVIAjAXQ&sig2=tpV3x0jQjuFZG4wG5n_LKQ&bvm=bv.91665533,d.bGQ&cad=rjt) (дата обращения: 10.02.2015).
12. Метод наименьших квадратов // Википедия – свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_наименьших_квадратов (дата обращения: 10.02.2015).
13. JAMA. Национальный институт стандартов и технологии // JAMA: A Java Matrix Package. 2012. URL: <http://math.nist.gov/javanumerics/jama/> (дата обращения: 10.02.2015).
14. Высокоточное определение местоположения пользователя в режиме реального времени с помощью системы слежения в помещении и на улице / Бун-Глин Ли, Сын Чул Ли, Ван-Янг Чунг, Эрин-е-е-Лин Лай // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2008, ноябрь. – Вып. 2. – № 1. – С. 534–548.
15. Timko I., Dyreson C., Bach Pedersen T. A probabilistic data model and algebra for location-based data warehouses and their implementation. New York: Springer Science+Business Media, 2013. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10707-013-0180-4/fulltext.html> (дата обращения: 10.02.2015).
16. Ксю Дж., Гёттинг Р. Общая модель данных для движущихся объектов // Геоинформатика. – 2013. – № 17. – С. 125–172.
17. Хайбрахманов Т.С. Геоинформационное картографирование функциональных зон городских территорий по космическим снимкам // Геоинформатика. – 2014. – № 1. – С. 55–62.
18. Пространственно-временная модель сжатия траекторий в улично-дорожной сети / Ю. Санду Поп, К. Зайтони, В. Ориа, А. Харатт // Геоинформатика. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 117–145.
19. Информационно-аналитическая система «Интерактивная карта города Дубна» / Е.Н. Черемисина, Л.Ф. Спивак, И.Л. Спивак, В.С. Духанин // Геоинформатика. – 2014. – № 1. – С. 7–15.
20. Вичугова А.А. Методы и средства концептуального проектирования информационных систем: сравнительный анализ структурного и объектно-ориентированного подходов // Прикладная информатика. – 2014. – № 1. – С. 56–65.
21. We build market research apps // Mobile market research. 2015. URL: <http://www.mobilemarketresearch.net/> (дата обращения: 10.02.2015).

Поступила 09.02.2015 г.

UDC 004.738:004.45

MOBILE VISUALIZATION OF DATA ON WIRELESS NETWORK ELECTROMAGNETIC RADIATION

Boris I. Samoylenko,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: boris-1991@mail.ru

Vladimir N. Vichugov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vlad@tpu.ru

Anna A. Vicugova,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vichugovaaa@tpu.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to analyze the influence of wireless networks to human health. This problem is oriented to such science directions as geoecology and geoinformatics. The density of electromagnetic pollution is analyzed through determining the number of radiation sources and their radius of action.

The main aim of the study is to search and analyze the information on electromagnetic radiation emanating from surrounding wireless networks: cellular, Wi-Fi and Bluetooth, using specially developed software for mobile devices.

The methods used in the study: methods and tools for software design and development, geographic information systems, mathematical methods of triangulation, multivariate optimization and filtering of signals, the inverse square law, practical measurement experiments.

The results. The authors have stated and solved the problem of searching and analyzing the information on electromagnetic radiation emanating from the surrounding wireless networks: cellular, Wi-Fi and Bluetooth. The paper describes the methods and tools, technologies, programming and mathematical foundations of the developed mobile Android-application and considers the issues of receiving, triangulation and filtering radiation signals. The developed Android-platform mobile software is described in details; the paper is illustrated by screenshots. The results of experimental measurements and calculations of the radiation source power, and the range of the wireless network (cellular, Wi-Fi and Bluetooth) are analyzed.

Key words:

Geoecology, geoinformatics, mobile application, wireless networking, signal triangulation.

REFERENCES

1. *Sotovye telefony i rak mozga: est li svyaz?* [Cell phones and brain cancer: is there a connection?]. Available at: <http://www.revel-mob.com/ru/%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%B3/сотовый-телефон-и-рак-мозга-есть-ли-связь> (accessed 06 February 2015).
2. *Sanitarnye pravila i normy SanPiN 2.2.4/2.1.8.055 96 «Elektromagnitnye izlucheniya radiochastotnogo diapazona (EMI RCh)»* [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.2.4/2.1.8.055 96 «Radio frequency energy»]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 1993. 10 p.
3. *Gigienicheskie normativy GN 2.1.8./2.2.4.019–94 «Vremennye dopustimye urovni vozdeystviya elektromagnitnykh izlucheny, sozdavaemykh sistemami sotovoy radiosvyazi»* [Hygienic standards GN 2.1.8./2.2.4.019–94 «Temporary permissible levels of exposure to electromagnetic radiation produced by cellular radio systems»]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 1994. 12 p.
4. *Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy SanPiN 2.2.4.1191–03 «Elektromagnitnye polya v proizvodstvennykh usloviyakh»* [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.2.4.1191–03 «Electromagnetic fields in the working environment»]. Moscow, Minzdrav Rossii Publ., 2003. 10 p.
5. Dunaev V.N. elektromagnitnye izlucheniya i riskpopulyazionno-myy zdorovyyu pri ispolzovanii sredstv sotovoy svyazi [Electromagnetic radiation and the risk of population health with the use of the cellular]. *Hygiene and Sanitation*, 2007, no. 6, pp. 56–57.
6. The Shocking Demographics of Cell Phone Use. *Visually*. Available at: <http://visual.ly/shocking-demographics-cell-phone-use> (accessed 10 February 2015).
7. Chto takoe 1G, 2G, 3G, 4G i vse chto mezhdumimi [What is 1G, 2G, 3G, 4G and everything between them]. *Habrahabr*. Available at: <http://habrahabr.ru/post/112535/> (accessed 10 February 2015).
8. Pokolenie mobilnoy telefonii [History of mobile phones]. *Wikipedia, the free encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_mobile_phones (accessed 10 February 2015).
9. Rynok mobilnykh OS v 2012 godu po versii IDC [The market of mobile operating systems in 2012 by the IDC]. *3DNews. Daily Digital Digest*. Available at: <http://www.3dnews.ru/news/641673> (accessed 10 February 2015).
10. Veb-sluzhby API Google kart [Web-services of API Google maps]. *Google Developers*. Available at: <https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/?hl=ru> (accessed 10 February 2015).
11. Bardwell J. Converting Signal Strength Percentage to dBm Values. Available at: https://madwifi-project.org/attachment/wiki/UserDocs/RSSI/Converting_Signal_Strength.pdf (accessed 10 February 2015).
12. Metod naimenshih kvadratov [Least square method]. *Wikipedia, the free encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares (accessed 10 February 2015).
13. JAMA: natsionalny institut standartov i technology [JAMA: National Institute of Standards and Technology]. *JAMA: a Java Matrix Package*. Available at: <http://math.nist.gov/javanumerics/jama/> (accessed 10 February 2015).
14. Boon-Glin Lee, Seung-Chul Lee, Wan-Young Chung, Erin-Ee-Lin Lau. Vysokochastotnoe opredelenie mestopolozheniya polzovate-

- lya v rezhime realnogo vremeni s pomoshchyu sistemy slezheniya v pomeshchenii i na ulitse [Enhanced RSSI-based High Accuracy Real-Time User Location Tracking System for Indoor and Outdoor Environments]. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2008, November, Iss. 2, no. 1, pp. 534–548.
15. Timko I., Dyreson C., Bach Pedersen T. *A probabilistic data model and algebra for location-based data warehouses and their implementation*. New York, Springer Science+Business Media, 2013. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10707-013-0180-4/fulltext.html> (accessed 10 February 2015).
 16. Xu J., Güting R. obshchaya model dannykh dlya dvizhushchikhsya obektov [Ageneric data model for moving objects] *Geoinformatica*, 2013, no. 1, pp. 125–172.
 17. Khaybrakhmanov T.S. Geoinformatsionnoe kartografirovaniye funktsionalnykh zon gorodskikh territoriy po kosmicheskim snimkam [GIS mapping of urban functional zones (types of land use) by satellite images]. *Geoinformatica*, 2014, no. 1, pp. 55–62.
 18. Sandu Pop I., Zeitouni K., Oria V., Kharrat A. Prostranstvenno-vremennoe szhatie traektoriy ulichno-dorozhnoy seti [Spatio-temporal compression of trajectories in road networks]. *GeoInformatica*, 2015, January, vol. 19, Iss. 1, pp. 117–145.
 19. Cheremisina E.N., Spivak L.F., Spivak I.L., Dukhanin V.S. Informatsionno-analiticheskaya sistema «Interaktivnaya karta goroda Dubna» [Information-analytical system «Interactive map of Dubna»]. *Geoinformatica*, 2014, no. 1, pp. 7–15.
 20. Vichugova A.A. Metody i sredstva kontseptualnogo proektirovaniya informatsionnykh sistem: sravnitelny analiz strukturnogo i obektno-orientirovannogo podkhodov [Methods and tools to conceptual design of information systems]. *Journal of Applied Informatics*, 2014, no. 1, pp. 56–65.
 21. We build market research apps. *Mobile market research*. 2015. Available at: <http://www.mobilemarketresearch.net/> (accessed 10 February 2015).

Received: 09 February 2015.

УДК 621. 315. 592

ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА InGaTe_2 **Годжаев Эльдар Мехрали оглы,**

д-р физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный деятель науки
Азербайджанской Республики, заведующий кафедрой физики и
НИЛ «Физика и техника наноструктур» Азербайджанского технического
университета, Азербайджанская Республика, АЗ-1000,
г. Баку, пр. Г. Джавида, 25. E-mail: geldar-04@mail.ru

Улькар Абдурахманова Сардар кызы,

докторант, старший лаборант НИЛ «Физика и техника наноструктур»
Азербайджанского технического университета, Азербайджанская
Республика, АЗ-1000, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25. E-mail: uulker12@mail.ru

Кулиева Самира Оруджукулу кызы,

кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры «Электроника»
Азербайджанского технического университета, Азербайджанская
Республика, АЗ-1000, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25. E-mail: S.quliyeva@mail.ru

Цель работы: Получение и исследование вольтамперной характеристики монокристаллов и тонких пленок соединения InGaTe_2 в статическом и динамическом режимах, при различных температурах и при различных площадях контактов.

Методы исследования. Монокристаллы InGaTe_2 были выращены методами Бриджмена–Стокбаргера, а тонкие пленки получены с использованием метода конденсации из паровой фазы. Рентгенограммы InGaTe_2 получены на дифрактометре ДРОН-2 в CuK_α излучении ($\lambda=1,54178\text{Å}$). Параметры элементарной ячейки определили с точностью $0,005\text{Å}$. Вольт-амперная характеристика исследована на образцах прямоугольной формы размерами $7\times1\times1\text{ мм}^3$. Kontakтами служили In и Cu . Ток, снабжающий концы прямоугольных образцов, ориентирован так, что ток через образец протекает вдоль по оси $\bar{c}$ монокристалла InGaTe_2 . Вольт-амперная характеристика исследовалась на постоянном токе в статическом и динамическом режимах.

Результаты: Рентгенофазовым анализом выявлено, что соединение InGaTe_2 кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки $a=8,463\text{Å}$; $c=6,981\text{Å}$. Исследовались статическая и динамическая вольт-амперные характеристики InGaTe_2 при различных температурах, изменение температуры образцов в области отрицательного дифференциального сопротивления, зависимость порогового напряжения от температуры, вольт-амперная характеристика тонких пленок InGaTe_2 при различных площадях контактов. Выявлено, что данная фаза обладает переключающими свойствами с памятью и с уменьшением температуры величина порогового напряжения увеличивается, в результате S-образная характеристика становится ярко выраженной. Проанализировано изменение порогового напряжения с изменением температуры. Исследовались ВАХ тонких пленок в зависимости от площади и от размера самой пленки. Выявлено, что пленки также обладают переключающими свойствами и с уменьшением площади контактов величина порогового напряжения, при котором происходит переключение, уменьшается. А также изменением температуры и площади контактов управляется величина порогового напряжения. А это означает, что данная фаза может успешно применяться при создании быстродействующих и высокочувствительных приборов.

Ключевые слова:

Переключения, рентгенофазовый анализ, тонкие пленки, S-образная характеристика, пороговое напряжение, цепочечная структура, соединения InGaTe_2 .

Введение

Соединения типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ до сих пор не потеряли свою актуальность благодаря своим уникальным физическим свойствам и практическим применениям. Соединения вышеуказанного типа и их тройные аналоги $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ относятся к группе цепочно-слоистых кристаллов [1–3]. Эти соединения занимают особое место среди соединений с кристаллической структурой с высокой анизотропией. В литературе известны многочисленные работы, посвященные структурным, физико-химическим, электрофизическим, фотоэлектрическим и другим свойствам тройных соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ [1–5]. В частности, наряду с исследованиями физических свойств, были вычислены зонные структуры, оптические функции, определены эффективные массы электронов и дырок, исследования-

ми вольтамперных характеристик соединения типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ выявлено, что эти соединения обладают переключающими свойствами с памятью [5]. В литературе имеются многочисленные работы, посвященные исследованию вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых соединений и твердых растворов, а также поиску новых материалов с более качественными физическими параметрами [6, 7]. В этих работах исследовались особенности ВАХ планарных образцов и тонких пленок, влияние периферии контактов на свойства материала, эффект резистивного переключения и т. д. В работах [8–11] рассмотрены особенности ВАХ в стеклообразных халькогенидах, а в работах [12–17] подробно и убедительно доказано, что эффект переключения, выявленный в кристаллических и аморфных полупроводниках, с уверенно-

стью можно объяснить на основе электронно-теплового механизма [18–23]. Однако свойства, в том числе и ВАХ, соединения InGaTe_2 изучены недостаточно. В связи с этим целью данной работы является исследование вольтамперной характеристики соединения InGaTe_2 .

Методика эксперимента

Для синтеза InGaTe_2 использовали элементы со следующей чистотой: In – особо чистый, Ga – 99,996 и Te – 99,990 %. Ампулы очищались смесью HF с дистиллированной водой. После химической очистки вакуумированную до 0,01333 Па ампулу помещали в печь при 1000 °C на 24 ч, после чего охлаждали до комнатной температуры, наполняли исходными элементами. Для гомогенизации сплава смесь выдерживалась 24 часа при температуре 970 °C. Во время процесса синтеза ампулы часто встряхивали с целью лучшего смешивания составных частей. Далее ампула с веществом со скоростью 1,33 мм/ч перемещалась из высокотемпературной зоны в зону кристаллизации с соответствующей температурой 700 °C. После охлаждения до комнатной температуры полученные кристаллы подвергались рентгенофазовому анализу. Рентгенограммы соединения InGaTe_2 снимали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 в CuK_α излучении ($\lambda=1,54178\text{Å}$). Параметры элементарной ячейки определили с точностью 0,005 Å.

Вольтамперная характеристика была исследована на образцах прямоугольной формы размерами $7\times1\times1\text{мм}^3$. Kontakтами служили In и Cu. Kontakты были проверены четырехточечным методом, последовательным измерением сопротивления на образцах. Ток, снабжающий концы прямоугольных образцов ориентирован так, что ток через образец протекает вдоль оси $\vec{c}$ монокристалла. ВАХ InGaTe_2 исследовались и на тонких пленках. Тонкие пленки получены путем конденсации из паровой фазы, поскольку этот способ обеспечивает относительно простые условия технологического процесса и достаточно хорошую воспроизводимость физических параметров. ВАХ исследовались на постоянном токе по стандартной методике, описанной в работе [2].

Экспериментальные результаты

Расшифровкой рентгенограммы было выявлено, что InGaTe_2 , так же как и его тройные аналоги с цепочечной структурой, кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки $a=8,463\text{Å}$; $c=6,981\text{Å}$, с числом формульных единиц в элементарной ячейке $z=4$ и пространственной группой $\bar{1}4/m\bar{2}$. Результаты индирования рентгенограммы приводятся в таблице.

Результаты исследования вольтамперной характеристики при статическом режиме приводятся на рис. 1–4. На рис. 1 приводится ВАХ InGaTe_2 при статическом режиме при различных температурах.

Таблица. Результаты рентгенофазового анализа InGaTe_2
Table. Results of x-ray diffraction analysis of InGaTe_2

θ	$d_{\text{расч.}}$, Å	$d_{\text{эксп.}}$, Å	hkl	$I_{\text{отн.}}$
10°31'	4,2300	4,2217	200	6
13°42'	3,2600	3,2554	211	100
22°26'	2,9911	2,020	220	14
23°1'	1,9685	1,9661	411	33
23°22'	1,9439	1,9442	332(402)	29

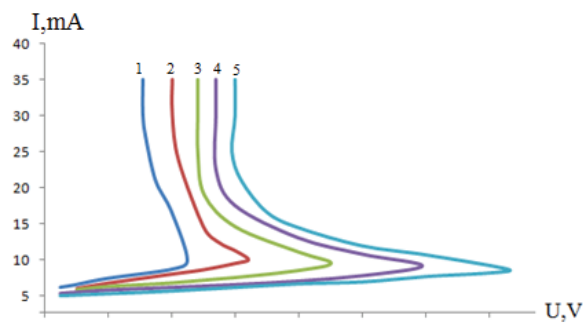


Рис. 1. Вольтамперные характеристики InGaTe_2 при различных температурах, где 1 – 350; 2 – 300; 3 – 250; 4 – 200; 5 – 80 K

Fig. 1. Current-voltage characteristic of InGaTe_2 at different temperatures, where 1 is 350; 2 is 300; 3 is 250; 4 is 200; 5 is 80 K

Вольтамперная характеристика InGaTe_2 измерялась при различных окружающих температурах, в интервале температур 80–350 K (рис. 1). Как видно, при низких напряжениях $I(U)$ зависимость является линейной и контакт является омическим.

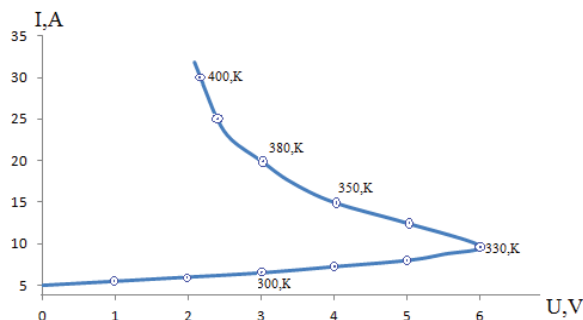


Рис. 2. Вольтамперная характеристика InGaTe_2 (на графике показаны изменения температуры образца в области отрицательного дифференциального сопротивления)

Fig. 2. Current-voltage characteristic of InGaTe_2 (the diagram demonstrates changes in the sample temperature in the region of negative differential resistance)

С увеличением напряжения $I(U)$ характеристика затухала и была строго нелинейной и S-образной формы. Выявлено, что в омической области температура образца остается постоянной, а в области отрицательного дифференциального сопротивления увеличивается до температуры T , обычно больше, чем окружающая температура. S-образная характеристика в области высоких токов с лучшей выра-

женной областью отрицательного сопротивления становится впоследствии критическим током (пороговый ток). Часть отрицательного дифференциального сопротивления на кривой прибора сильнее выражена при низких окружающих температурах. Как видно из кривой, переход от низких к высоким электропроводностям при низких температурах скачкообразный. В области отрицательного дифференциального сопротивления $I(U)$ кривой мы измеряли температуру образца в каждой точке, посредством термоэлемента, прикладываемого к образцу. Для этой цели была использована теплопроводящая и электрически изоляционная паста. Результаты показаны на рис. 2. Эксперимент показал, что температура образцов была выше, чем окружающая температура.

На рис. 3 изображена зависимость температуры от протекающего через образец тока.

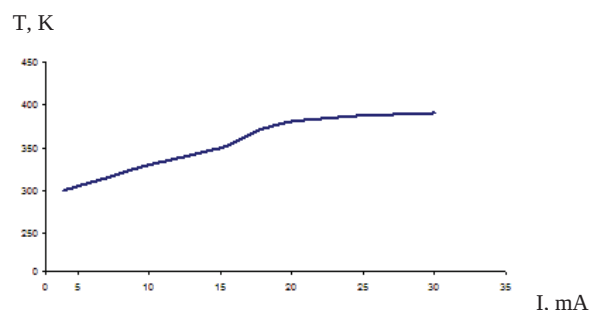


Рис. 3. Зависимость температуры InGaTe_2 от протекающего через образец тока

Fig. 3. Dependence of InGaTe_2 temperature on current flowing through the sample

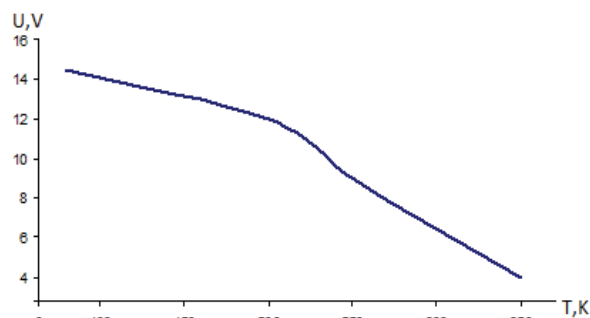


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения от температуры для InGaTe_2

Fig. 4. Dependence of InGaTe_2 threshold voltage on temperature for InGaTe_2

На рис. 4 показана зависимость порогового напряжения от температуры образца. Анализ полученных результатов показывает, что область, контролируемая током, корректирована с увеличением температуры образца. Согласно полученным (рис. 1) данным, происходит миграция порогового напряжения к высоким значениям с уменьшением окружающей температуры и слабое проявление области отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперной характеристике

вследствие увеличения окружающей температуры. Эти факты доказывают, что электротепловые процессы ответственны в появлении области отрицательного дифференциального сопротивления [13]. В электротепловых процессах допускаются малые локальные отклонения от однородного распределения несовершенств, приводящих к высоким токовым плотностям в этих областях. Такое повышение токовой плотности обычно сопровождается формированием высоко-токовой плотности ниже накала в образцах. В «каналах» повышенная токовая плотность, т. е. увеличение энергии рассеяния, приводит к Джоулеву теплу. Так как температура увеличивается, то электропроводность тоже увеличивается и даёт возможность протеканию тока.

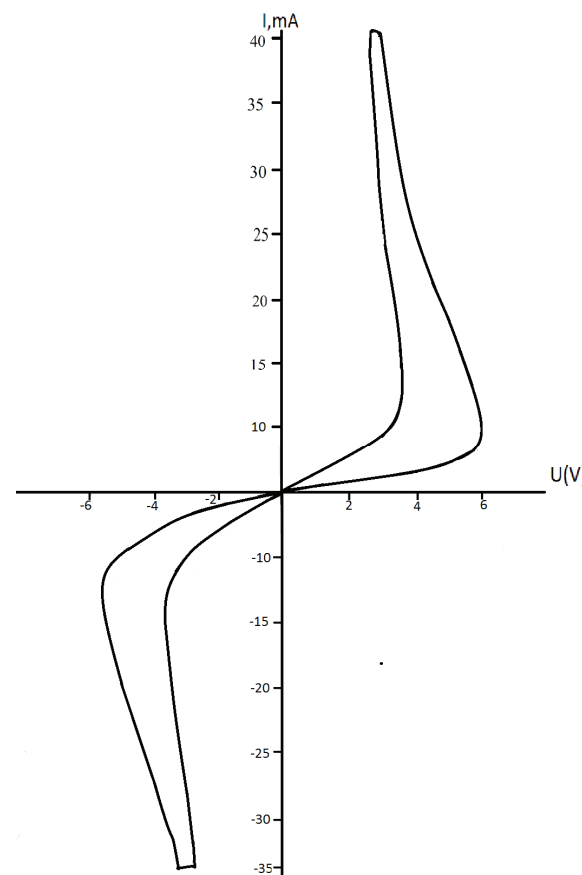


Рис. 5. Вольтамперная характеристика пленки InGaTe_2 с толщиной 50 мкм в динамическом режиме

Fig. 5. Current-voltage characteristic of InGaTe_2 film with thickness of 50 μm in dynamic mode

Устойчивое состояние этого поведения будет тогда, когда тепловое рассеяние будет равно тепловым потерям.

Таким образом, представленные выше экспериментальные результаты по исследованию ВАХ InGaTe_2 могут быть описаны электронно-тепловым процессом. Мы допускаем в первом приближении, что нить накала занимает весь образец. Эта модель [24] была предложена в случае соединений TlInX_2 (X-Se, Te) и получила удовлетворительные результаты [25].

Полученные нами результаты (рис. 1, 2, 5) по исследованию ВАХ InGaTe₂ выявили, что при малых значениях напряжений сила тока изменяется линейно и начиная с определенного значения напряжения образец скачкообразно переходит из высокоомного состояния в низкоомное, т. е. ВАХ этих фаз является S-образной, на характеристиках имеются области отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 1). С уменьшением рабочей температуры увеличивается величина порогового напряжения, т. е. при температуре 350 К напряжение порогового переключения соответствует 4,5 В; при 300 К – 6,4 В; при 250 К – 9 В; при 200 К – 11,9 В; при 80 К – 14,6 В.

Мы попытаемся, используя имеющиеся к настоящему времени модели, объяснить сущность эффекта переключения в соединении InGaTe₂. Участок ОС на ВАХ диода на основе InGaTe₂ может образоваться только при наличии внутренней положительной обратной связи. Для диода с S-образной вольтамперной характеристикой образуется положительная обратная связь по току. Это означает, что любое изменение тока должно вызывать дальнейшее его изменение в том же направлении. Анализируем условия возникновения отрицательного дифференциального сопротивления в InGaTe₂ с р-п переходом. Такой диод можно представить в виде последовательно включенного электронно-дырочного перехода и сопротивления высокоомной базовой области образцов.

В этом случае приложенное к диоду на основе соединения InGaTe₂ напряжение U состоит из падения напряжения на р-п переходе U_0 и на толще базы U_T :

$$U = U_0 + U_T, \quad (1)$$

причем

$$U_T = IR_T = \frac{I}{\sigma_T}; \quad U_0 = \left(\frac{\beta kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right);$$

где I_0 – предэкспоненциальный множитель; β – коэффициент, принимающий значения между 1 и 2 в зависимости от параметров р-п перехода и протекающего тока; R_T и σ_T – сопротивление и проводимость толщи базы диода: $\sigma_T = \sigma_0 + \sigma^*$ (σ_0 – проводимость базы в отсутствие инжекции, σ^* – добавочная проводимость, обусловленная инжекцией и возрастающая при увеличении тока через образец).

В случае, когда материал однороден и не содержит центров захвата, концентрация инжектированных носителей тока растет линейно с увеличением тока через р-п переход. При наличии ловушек или неоднородностей проводимости в базовой области с изменением протекающего тока будет изменяться не по линейному, а по более сложному закону, который можно выразить в виде

$$\sigma_T = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{I}{I_1} \right)^\gamma \right],$$

где I_1 – постоянная величина, выраженная через электрофизические параметры материала базы.

В этом случае выражение (1) примет вид:

$$U = \frac{Id}{\sigma_0 \left[1 + \left(\frac{I}{I_1} \right)^\gamma \right]} + \frac{\beta kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right). \quad (2)$$

Дифференцированием уравнение (2) находим дифференциальное сопротивление прямой ветви рассматриваемого диода:

$$\frac{dU}{dI} = \frac{1 + \left(\frac{I}{I_1} \right)^\gamma (1 - \gamma)}{\sigma_0 \left[1 + \left(\frac{I}{I_1} \right)^\gamma \right]^2} d + \frac{\beta kT}{q(I + I_0)}.$$

При переходе от положительного дифференциального сопротивления к отрицательному $\frac{dU}{dI} = 0$. Поэтому условие существования отрицательного сопротивления может быть записано в виде:

$$1 + \left(\frac{I}{I_1} \right)^\gamma (1 - \gamma) + \frac{\beta kT}{qd} \frac{\sigma_0 [(1 + I/I_0)^\gamma]}{I + I_0} = 0.$$

Это условие может выполняться только при $\gamma > 1$. При линейной и более слабой зависимости проводимости базы от тока через р-п переход, т. е. при $\gamma \leq 1$, участок ОС на ВАХ отсутствует. Таким образом, из приведенного примера видно, что изменение проводимости базы только за счет инжекции не приводит к появлению участка ОС на ВАХ диода. Должна существовать еще одна причина изменения проводимости.

При малых напряжениях сопротивление базы велико и почти все приложенное напряжение падает на диоде. С ростом напряжения концентрация инжектированных носителей в базе увеличивается, и ее сопротивление падает. Однако при $\gamma \leq 1$ R_T уменьшается не быстрее, чем сопротивление р-п перехода. Поэтому с ростом тока полное напряжение растет. Ток является монотонной функцией приложенного напряжения. Если же $\gamma > 1$, то проводимость толщ возрастает быстрее, чем проводимость р-п перехода. Это приводит к уменьшению доли падения напряжения на базе, что приводит к усилению и новому перераспределению напряжения между базой и р-п переходом. Это и есть положительная обратная связь, необходимая для появления отрицательного сопротивления. Таким образом, в InGaTe₂ обязательным условием возникновения отрицательного сопротивления является существование дополнительного, сопровождающего инжекцию механизма возрастания проводимости базовой области. Для понимания природы отрицательного сопротивления необходимо рассмотреть именно эти, дополнительные к инжекции, физические явления.

Вольтамперная характеристика с длинной базой ($d \gg L$) и при коэффициенте инжекции р-п перехода равном единице может быть приближенно представлена следующим выражением [26]:

$$I = \frac{kTch(d/L)}{2q\rho_0 L(b+1)} (e^{qU/ckT} - 1),$$

где L – длина диффузионного смещения при высоких уровнях инжекции; ρ_0 – удельное сопротивление; b – отношение подвижностей электронов и дырок; d – толщина базовой области:

$$C = 2(b + chd/L)/(b+1).$$

Константа c экспоненциально возрастает с ростом отношения d/L . Поэтому полный ток очень сильно зависит от этого отношения. Если с ростом уровня время жизни увеличивается, то это приводит к резкому возрастанию тока. Концентрация носителей тока на базе лавинно возрастает. Инжектирование р-п переходом неосновных носителей повышает их время жизни в объеме. По этой причине происходит дальнейшее снижение сопротивления базы, что приводит к перераспределению напряжения между базой и р-п переходом. Доля напряжения на р-п переходе увеличивается. В результате происходит дополнительная инжекция носителей тока, дальнейшее увеличение времени жизни и т. д. Такой процесс и приводит к появлению ОС на ВАХ соединения InGaTe_2 .

Следует отметить, что для исследования ВАХ тонких пленок с различными геометрическими размерами необходимо было получить образцы, в которых формовка является незначительной либо не происходит вообще, в противном случае смысл геометрических размеров образцов, определенных как площадь сечения и расстояния между контактами, теряется. В пленках InGaTe_2 при высоких напряжениях наблюдается экспоненциальный рост тока с напряжением. Обычно первоначальное возрастание тока связывают с эмиссией, обусловленной эффектом Шоттки из контактов

$$I = \text{Vexp}(\beta V^{1/2}).$$

ВАХ тонкой пленки InGaTe_2 , снятая в динамическом режиме, приводится на рис. 5. Из рис. 5, следует, что в широком интервале напряжений наблюдается область отрицательного дифференциального сопротивления. Характеристика является S-образной, а InGaTe_2 обладает переключающими свойствами с памятью. Исследовались зависимости тока от напряжения для пленок InGaTe_2 одинакового размера с разной площадью контактов (рис. 6). Как следует из рис. 6, пороговый ток и величина порогового падения напряжения на образце заметным образом уменьшаются с ростом площади контакта.

Это удовлетворительно согласуется с моделью [13], так как с уменьшением площади контакта однородность образца возрастает. Таким образом, локальное развитие S-образной характеристики в неоднородности может повышать среднюю проводимость образца, приводить к формированию статических шнуров и уменьшению перепада напряжения при переключении.

Важной особенностью ВАХ в пленках InGaTe_2 является то, что шнур, возникающий при переключении также статический, хотя в отдельных случаях

наблюдались не релаксационные колебания напряжения в состоянии со шнуром. Такой шнур, по видимому, аналогичен захваченному на диоде домену сильного электрического поля в диоде Ганна. При достаточно большой неоднородности S-образный участок ВАХ вырождается, то есть статический шнур со своим параметром приближается к стабильному.

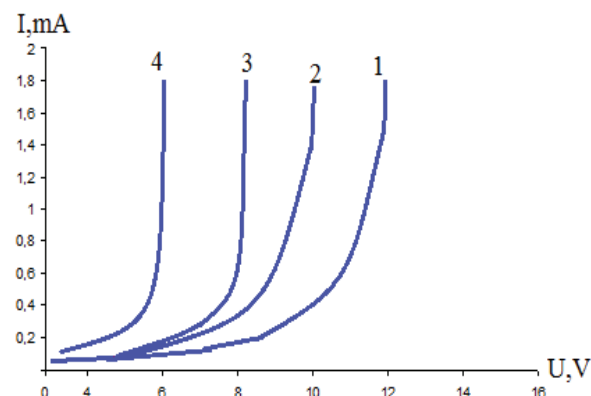


Рис. 6. Вольтамперная характеристика тонких пленок InGaTe_2 при различных площадях контактов, где 1 – $2 \cdot 10^{-5}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$

Fig. 6. Current-voltage characteristic of InGaTe_2 thin films at different contact areas, where 1 – $2 \cdot 10^{-5}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $3 \cdot 10^{-4}$; 4 – $3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$

Исследовались влияния размеров контактов на ВАХ тонких пленок InGaTe_2 (рис. 6). Выявлено, что с уменьшением площади контактов пороговое напряжение уменьшается. Исследование проводилось и на пленочных образцах различного размера. С увеличением диаметра контакта или сечения в образцах малой длины наблюдается лишь уменьшение порогового поля. В образцах большой длины пороговый ток сильно уменьшается.

Для пороговых переключателей при любой длине образца пороговое поле не зависит от площади контакта. Таким образом, наиболее универсальное явление в изученных образцах – это отсутствие радиальных неоднородностей тока в широком интервале длины. В более длинных образцах, изготовленных из материалов с памятью, появляется радиальная неоднородность. До пороговой области радиальная неоднородность возникает лишь в непосредственной близости к точке срыва.

Перечислим основные особенности влияния размеров на вид ВАХ InGaTe_2 :

- уменьшение поперечных размеров образца изменяет как до-, так и после-пороговую части ВАХ;
- при увеличении продольных размеров образцов размерные эффекты в до-пороговой части ВАХ сохраняются, а в после-пороговой исчезают;
- размерные эффекты не могут быть обусловлены реактивностью образца, так как уменьшение площади контакта и увеличение продольных размеров уменьшают собственную ёмкость образца, но в соответствии с предыдущим пунктом имеют противоположное влияние на виды ВАХ в свойствах образца;

- пролётные эффекты играют существенную роль в формировании шнуров только в том случае, когда увеличение длины образца влечёт за собой увеличение пролётного времени носителей или снижает величину тока получения стабильного шнура.

В заключении следует отметить, что тройное соединение InGaTe_2 , обладающее переключающими свойствами с памятью, и его S-образная ВАХ могут успешно применяться в создании новых чувствительных переключателей.

Заключение

Исследования вольтамперной характеристики тройного соединения InGaTe_2 в статическом и динамическом режимах показало, что это соединение обладает переключающими свойствами с памятью.

Экспериментальные вольтамперные характеристики кристаллических образцов InGaTe_2 являются линейными при низких и нелинейными при высоких токовых плотностях. Нелинейный режим (ОДС-области) имеет S-образную форму.

Устойчивое состояние ВАХ и особенности их ОДС области можно интерпретировать электронно-тепловым механизмом.

Выявлено, что увеличение нагревания внутренней части образца приводит к повышенной концентрации свободных носителей в этой области из-за полупроводникового характера InGaTe_2 и уменьшению величины порогового напряжения. С уменьшением площади контактов и геометрического размера пленок величина порогового напряжения уменьшается, а с изменением окружающей температуры, размеров омических контактов и самих образцов из InGaTe_2 можно получить переключатели с требуемыми физическими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Waser R. Redox-based resistive switching memories // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2012. – № 12 (10). – С. 7628–7640.
2. Cluster-like resistive switching of SrTiO_3 : Nb surface layers / C. Rodenbücher, W. Speier, G. Bihlmayer, U. Breuer, R. Waser, K. Szot // New J. Phys. – 2013. – № 15. – 103017. DOI:10.1088/1367-2630/15/10/103017.
3. Расчет зонной структуры и оптических функций тройных соединений InGaSe_2 , InGaTe_2 / Э.М. Годжаев, П.Ф. Алиева, Р.С. Рагимов, У.С. Абдурахманова, А.А. Исмаилов Материалы // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: VIII Междунар. симпозиум. – М., 2013. – Т. I. – С. 59–67.
4. Годжаев Э.М. Суперионная проводимость в кристаллах // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 8. – С. 1009–1013.
5. Эффект переключения на тонких пленках TlInSe_2 / Э.М. Годжаев, К.Д. Гюльмамедов, Х.С. Халилова, С.О. Гулиева // Электронная обработка материалов. – 2011. – Т. 47. – № 5. – С. 18–22.
6. Моделирование вольтамперных характеристик фотогальванического элемента на основе оксида никеля / Д.К. Параничев, П.А. Болдин, Н.А. Кулдин, А.А. Величко, В.В. Путролайнен // Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7. – № 9. – С. 99–101.
7. Горхов Н.А. Влияние фото-эдс на прохождение тока в контактах металл–полупроводник с барьером Шоттки // ФТП. – 2011. – Т. 45. – № 7. – С. 965–973.
8. Цуканов Д.А., Рыжкова М.В., Борисенко Б.А. Влияние стехиометрического состава поверхностной фазы Si, Au, Ag на электрическую проводимость подложки // ФТП. – 2013. – Т. 47. – № 6. – С. 765–771.
9. Горхов Н.А., Новиков В.А. Влияние периферии контактов металл–полупроводник с барьером Шоттки на их электрофизические характеристики // ФТП. – 2011. – Т. 45. – № 1. – С. 70–81.
10. Строение и электронные свойства халькогенидных стеклообразных полупроводников / Г.А. Бордовский, В.А. Бордовский, А.В. Марченко, П.П. Серегин // в кн.: Физические свойства неупорядоченных полупроводников. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. – 240 с.
11. The Growth of Single Crystals of InGaSe_2 Compounds, their X-Ray-Phase Analysis, Electronic Structure and Optical Functions / E.M. Godzhayev, Z.A. Jahangirli, P. Alieva, Kh. Khalilova, T. Musaev // Journal of Inorganic non-metallic Materials. – 2013. – № 3. – P. 1–5.
12. Годжаев Э.М., Джафарова Г.С., Сафарова С.И. Зонная структура TlInTe_2 и термоэффективность твердых растворов на его основе // Термоэлектричество. – 2013. – № 1. – С. 28–33.
13. Богословский Н.А. Электронно-тепловая модель эффекта переключения и памяти, основанная на многофононной туннельной ионизации U-центров в халькогенидных полупроводниках: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2013. – 22 с.
14. Богословский Н.А., Ценден К.Д. Физика эффектов переключения памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // ФТП. – 2012. – Т. 46. – № 5. – С. 577–608.
15. Lencer D., Salinga M., Wuttig M. Design Rules for Phase-change Materials in Data Storage Application // Adv. Mater. – 2011. – Т. 23. – № 18. – С. 2030–2058.
16. Примесные центры олова в стеклообразных халькогенидах германия / Г.А. Бордовский, П.В. Гладких, М.Ю. Кожокар, А.В. Марченко, П.П. Серегин, Е.И. Теруков // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – № 10. – С. 1399–1404.
17. Кастро Р.А., Грабко Г.И. Исследование диэлектрических процессов в аморфных пленках $(\text{As}_2\text{Se}_3)_x(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{1-x}$ // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – № 5. – С. 622–624.
18. Использование перехода металл–полупроводник в тонкопленочных слоях SmS для создания переключающих устройств / П.А. Тетерик, А.В. Зенкевич, А.А. Чуприк, А.С. Батурич // Труды 54 науч. конф. МФТИ. – М., 2011. – С. 58–59.
19. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films in a current controlled mode / N. Almasov, N. Bogoslovskiy, N. Korobova et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – V. 358. – P. 3299–3303.
20. Котова М.С., Дронов М.А., Белогорохов И.А. Эффект резистивного переключения в полимерных материалах, содержащих металлические микрочастицы и энергонезависимая память на его основе // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2012. – V. 2. – С. 125501–1–122501–5.
21. Особенности вольтамперных характеристик в тонких пленках состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при использовании измерительной цепи с источником тока / С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, С.А. Козюхин, К.Д. Цэндин, Д. Арсова, В. Памукчиева // Тех. Физ. – 2014. – Т. 84. – № 3. – С. 80–84.
22. Tsensin K.D. Physics of Switching and Memory Effects in Chalcogenides // Universal Journal of Physics and Application. – 2014. – Т. 2. – № 2. – С. 53–59. DOI: 10.13189/ujpa.2014.020201
23. Эффект памяти формы и сверхэластичность сплавов никелида титана, имплантированных высокими дозами ионов / А.Д. По-

- гребняк, С.Н. Братушка, В.М. Береснев, N. Levintant-Zayonts // *Успехи химии*. – 2013. – Т. 82. – № 12. – С. 1135–1159.
24. I-U dependence of TlInX_2 (X=Se, Te) single crystals: the Ohmic and S-type regions / M. Haniyas, A.N. Anagnostopoulos, K. Kam-bas, J. Spyridelis // *Physical Review B*. – 1991. – V. 43. – № 5. – P. 4135–4140.
25. Effect of resistive switching and electrically driven insulator-conductor transition in PbZrO_3 single crystals / I. Jankowska Sumara, K. Szot, A. Majchrowski, K. Roleder // *PSS*. – 2013. – V. 210. – Iss. 3. – P. 507–512. DOI: 10.1002/pssa.201228586.
26. Маилов А.А. Переключающие приборы на основе аморфных полупроводниковых материалов // *Электронная техника. Сер. У1 Микроэлектроника*. – 1971. – Вып. 3. – С. 3–13.

Поступила 13.03.2014 г.

UDC 621. 315. 592

CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF InGaTe_2

Eldar Mehrali ogly Godzhayev,

Dr. Sc., Azerbaijan Technical University, 25, prospect Dzhavida, Baku, AZ-1000, Republic of Azerbaijan. E-mail: geldar-04@mail.ru

Ulkar Sardar gyzy Abdurahmanova,

Azerbaijan Technical University, 25, prospect Dzhavida, Baku, AZ-1000, Republic of Azerbaijan. E-mail: uulker12@mail.ru

Samira Orudjgulu gyzy Gulieva,

Cand. Sc., Azerbaijan Technical University, 25, prospect Dzhavida, Baku, AZ-1000, Republic of Azerbaijan. E-mail: S.guliyeva@mail.ru

The main aim of the research is to prepare and study the current-voltage characteristics of single crystals and thin films of InGaTe_2 compound in static and dynamic modes at different temperatures and for different contact area.

Methods: InGaTe_2 single crystals were grown by the Bridgman–Stockbarger, and thin films were prepared by the method of physical vapor deposition. InGaTe_2 radiographs were obtained on a DRON-2 CuK_α radiation ($\lambda=1,54178\text{\AA}$). The unit cell parameters were determined with an accuracy 0,005 $\text{\AA}$. The current-voltage characteristics was investigated on rectangular samples with dimensions $7\times1\times1\text{ mm}^3$. In and Cu served as contacts. Current supplying the ends of rectangular samples is oriented in the way that current flows through the sample along a single crystal axis $\bar{c}$ of InGaTe_2 monocrystal. The current-voltage characteristics were examined for constant current in static and dynamic modes.

Results. X-ray analysis revealed that InGaTe_2 compound crystallizes in tetragonal syngony with lattice parameters $a=8,463\text{\AA}$; $a=6,981\text{\AA}$. The authors have investigated the static and dynamic current-voltage characteristics of InGaTe_2 at different temperatures, change in the samples temperature in the region of negative differential resistance, dependence of the threshold voltage on the temperature, current-voltage characteristics of InGaTe_2 thin films at different contact area. It was ascertained that this phase has switching properties with memory. The threshold voltage increases at temperature decreases. The S-pattern becomes clearly expressed. The authors analyzed the change in the threshold voltage at temperature change. The CVC of thin films were investigated depending on the area and the size of the film itself. It was revealed that the films also exhibit switching properties and decreasing contact area with the magnitude of the threshold voltage at which the switching is reduced. The threshold voltage value is controlled by the changes in temperature and contact area. This means that this phase can be successfully used in the design of fast and highly sensitive instrumentation.

Key words:

Switching, X-ray analysis, thin films, S-shaped characteristic, threshold voltage, chain structure, InGaTe_2 compounds.

REFERENCES

- Waser R. Redox-based resistive switching memories. *J Nanosci Nanotechnol.*, 2012, vol. 12, no. 10, pp. 7628–7640.
- Rodenbücher C., Speier W., Bihlmayer G., Breuer U., Waser R., Szot K. Cluster-like resistive switching of SrTiO_3 : Nb surface layers. *New J. Phys.*, 2013, no. 15, 103017. DOI:10.1088/1367-2630/15/10/103017.
- Godzhaev E.M., Alieva P.F., Ragimov R.S., Abdurakhmanova U.S., Ismailov A.A. Raschet zonnnoy struktury i opticheskikh funktsiy trynykh soedineniy InGaSe_2 , InGaTe_2 [Calculation of the band structure and optical functions of ternary compounds InGaSe_2 , InGaTe_2]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy nauki. Mezhdunarodnyy simpozium* [Proc. of the VIII International Symposium. Fundamental and Applied Problems of science. – Moscow, 2013. Vol. I, pp. 59–67.
- Godzhaev E.M. Superionnaya provodimost v kristallakh TlGaTe_2 [Superionic conduction in TlGaTe_2 crystals]. *Semiconductor Physics and Technology Physics*, 2011, vol. 45, no. 8, pp. 1009–1013.
- Godzhaev E.M., Gulmammadov K.D., Khalilov Kh.S., Gulieva S.O. Effekt pereklyucheniya na tonkikh plenkakh TlInSe_2 [Switching effect in thin films TlInSe_2]. *Electronic Materials Processing*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 18–22.
- Paranichev D.K., Boldin P.A., Kuldin N.A., Velichko A.A., Putrolaynen V.V. Modelirovanie voltampernykh kharakteristik fotogalvanicheskogo elementa na osnove oksida nikelya [Modeling

- current-voltage characteristics of the photovoltaic cell on the basis of nickel oxide]. *VSTU Bulletin*, 2011, vol. 7, no. 9, pp. 99–101.
7. Gorkhov N.A. Vliyanie foto-eds na prokhozhdienie toka v kontaktakh metal–poluprovodnik s baryerom Shottki [Effect photo-emf on current flow in the metal–semiconductor contacts with Schottky barrier]. *FTP*, 2011, vol. 45, no. 7, pp. 965–973.
 8. Tsukanov D.A., Ryzhkova M.V., Borisenko B.A. Vliyanie stekhiometricheskogo sostava poverkhnostnoy fazy of Si, Au, Ag na elektricheskuyu provodimost podlozki [Effect of stoichiometric composition of Si, Au, Ag surface phase on substrate electrical conductivity]. *FTP*, 2013, vol. 47, no. 6, pp. 765–771.
 9. Gorkhov N.A., Novikov V.A. Vliyanie periferii kontaktov metal–poluprovodnik s baryerom Shottki na ikh elektrofizicheskie kharakteristiki [Effect of peripheral of metal–semiconductor contact with Schottky barrier on their electrical characteristics]. *FTP*, 2011, vol. 45, no. 1, pp. 70–81.
 10. Bordovskiy G.A., Bordovskiy V.A., Marchenko A.V., Seregin P.P. Stroenie i elektronnye svoystva khalkogenidnykh stekloobraznykh poluprovodnikov [Structure and electronic properties of chalcogenide semiconductors]. *Fizicheskie svoystva neuporyadochennykh poluprovodnikov* [Physical properties of disordered semiconductors]. St. Petersburg, A.I. Gertsen RGPU Press, 2011. 240 p.
 11. Godzhayev E.M., Jahangirli Z.A., Alieva P., Khalilova Kh., Musaev T. The Growth of Single Crystals of InGaSe_2 Compounds, Their X-Ray-Phase Analysis, Electronic Structure and Optical Functions. *Journal of Inorganic Non-metallic Materials*, 2013, no. 3, pp. 1–5.
 12. Godzhayev E.M., Dzharfarova G.S., Safarova S.I. Zonnaya struktura TlInTe_2 i termoeffektivnost tverdykh rastvorov na ego osnove [Band structure and thermal efficiency of TlInTe_2 and solid solutions based on TlInTe_2]. *Termoelektrichestvo*, 2013, no. 1, pp. 28–33.
 13. Bogoslovskiy N.A. *Elektronno-teplovaya model effekta pereklyucheniya i pamyati, osnovannaya na mnogofononnoy tunnelnoy ionizatsii U-tsentrov v khalkogenidnykh poluprovodnikakh*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Electron thermal model of switching and memory effect, based on multiphonon tunnel ionization of U-centers in chalcogenide semiconductors. Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2013. 22 p.
 14. Bogoslovskiy N.A., Tsenden K.D. Fizika effektivov pereklyucheniya pamyati v khalkogenidnykh stekloobraznykh poluprovodnikakh [Physics of memory switching in chalcogenide glassy semiconductors]. *FTP*, 2012, vol. 46, no. 5, pp. 577–608.
 15. Lencer D., Salinga M., Wuttig M. Design Rules for Phase-change Materials in Data Storage Application. *Adv. Mater.*, 2011, vol. 23, no. 18, pp. 2030–2034.
 16. Bordovskiy G.A., Gladkikh P.V., Kozhokar M.Yu., Marchenko A.V., Seregin P.P., Terukov E.I. Primesnye tsentry olova v stekloobraznykh khalkogenidakh germaniya [Impurity tin centers in germanium glassy chalcogenides]. *FTP*, 2011, vol. 45, no. 10, pp. 1399–1404.
 17. Kastro P.A., Grabko G.I. Issledovanie dielektricheskikh protsessov v amorfnykh plenkakh (As_2Se_3) ixBix [Study of dielectric processes in amorphous films (As_2Se_3) ixBix]. *FTP*, 2011, vol. 45, no. 5, pp. 622–624.
 18. Teterik P.A., Zenkevich A.V., Chuprikov A.A., Baturin A.S. Ispolzovanie perekhoda metal–poluprovodnik v tonkoplennoknykh sloyakh SmS dlya sozdaniya pereklyuchayushchikh ustroystv [Using a metal–semiconductor transition in SmS thin layers to create switching devices]. *Trudy 54 nauchnoy konferentsii MFTI* [Proc. 54 MIPT scientific conference]. Moscow, 2011. pp. 58–59.
 19. Almasov N., Bogoslovskiy N., Korobova N. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films in a current controlled mode. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, pp. 3299–3303.
 20. Kotova M.S., Dronov M.A., Belogorokhov I.A. Effekt rezistivnogo pereklyucheniya v polimernykh materialakh, sodershashchikh metallicheskie mikrochastitsy i energozavisimaya pamyat na ego osnove [Resistive switching effect in polymeric materials containing metal microparticles and non-volatile memory based on it]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta MGU – Scientists note of the MSU Physics Department*, 2012, vol. 2, pp. 125501–1–122501–5.
 21. Fefelov S.A., Kazakov L.P., Kozyukhin S.A., Tsenden K.D., Arsova D., Pamukchieva V. Osobennosti volt-ampernykh kharakteristik v tonkikh plenkakh sostava $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ pri ispolzovanii izmeritelnoy tsepi s istochnikom toka [Features of the current-voltage characteristics of thin films of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ using measuring circuit with a current source]. *Tekhnicheskaya fizika*, 2014, vol. 84, no. 3, pp. 80–84.
 22. Tsenden K.D. Physics of Switching and Memory Effects in Chalcogenides. *Universal Journal of Physics and Application*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 53–59. DOI: 10.13189/ujpa.2014.020201.
 23. Pogrebnyak A.D., Bratushka S.N., Beresnev V.M., Levintant-Zayonts N. Effekt pamyati formy i sverkhelastichnost splavov nikelida titana, implantirovannykh vysokimi dozami ionov [The shape memory effect and superelasticity NiTi alloy implanted with high doses of ions]. *Russian Chemical Reviews*, 2013, vol. 82, no. 12, pp. 1135–1159.
 24. Haniyas M., Anagnostopoulos A.N., Kambas K., Spyridelis J. I-U dependence of TlInX_2 (X=Se, Te) single crystals: The Ohmic and S-type regions. *Physical Review B*, 1991, vol. 43, no. 5, pp. 4135–4140.
 25. Jankowska-Sumara I., Szot K., Majchrowski A., Roleder K. Effect of resistive switching and electrically driven insulator-conductor transition in PbZrO_3 single crystals. *PSS*, 2013, vol. 210, Iss. 3, pp. 507–512. DOI: 10.1002/pssa.201228586.
 26. Mailov A.A. Pereklyuchayushchie pribory na osnove amorfnykh poluprovodnikovykh materialov [Switching devices based on amorphous semiconductor materials]. *Electronic Technology. Ser. U1 Microelectronics*, 1971, no. 3, pp. 3–13.

Received: 13 March 2014.

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 ($U_{пр-}$, Φ_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

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати *xx.xx.2015*. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 14,73.
Заказ *xxx-15*. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru