

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



ISSN 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 327, № 1, 2016

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Остальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Турция)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ЭЛ № ФС 77-63827 от 27 ноября 2015 г.

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

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

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 2413-1830

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

Volume 327, № 1, 2016

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2016

AIMS AND SCOPE

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

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate EL no. FM 77-63827, November 27, 2015 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | |
|---|--|
| <p>Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями
 Баласанян С.Ш.</p> <p>Изменение химического состава подземных вод Республики Алтай при землетрясениях
 Шитов А.В., Кац В.Е., Дутова Е.М., Молоков В.Ю., Покровский В.Д.</p> <p>Использование различных вычислительных систем для решения задачи автоматической классификации облачности по спутниковым данным MODIS на основе вероятностной нейронной сети
 Скороходов А.В., Аксёнов С.В., Аксёнов А.В., Лайком Д.Н.</p> <p>Вещественный состав и физические свойства алевропелитовых пород Ишимской свиты юга Тюменской области. Возможные направления их практического использования
 Смирнов П.В., Константинов А.О., Иванов К.С.</p> <p>О создании геоинформационных систем на основе гиперсетей для организации инженерной инфраструктуры современных городов
 Токтошов Г.Ы.</p> <p>Экспериментальное исследование структурной стабильности стенок котельных труб
 Любимова Л.Л., Заворин А.С., Ташлыков А.А., Артамонцев А.И.</p> <p>Образование кремнийорганических соединений в процессах очистки воды
 Костикова Л.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И., Егоров Н.Б.</p> <p>Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя
 Лавренев Е.О.</p> <p>Нефтегазовая наука и практика XXI века: новые идеи и парадигмы
 Запывалов Н.П.</p> <p>Формирование граф-модели диагностирования коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя с учетом тепловых факторов
 Харламов В.В., Шкодун П.К., Хлопцов А.С., Долгова А.В.</p> <p>Формирование газового потока в плазмохимическом реакторе
 Мышкин В.Ф., Хан В.А., Беспала Е.В., Тихи М., Ижойкин Д.А.</p> <p>Мониторинг переноса придонного потока осадков в прибрежно-морской зоне шельфа для выявления основных параметров моделей состояния экосистем
 Ильин В.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Гальцев А.А., Зарипов О.М., Долгополов Д.В.</p> <p>Моделирование гидрогеологических условий для обоснования противооползневых мероприятий на участке набережной реки Камы в городе Перми
 Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И.</p> <p>Оценка условий сжигания высоковолажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования
 Тайлашева Т.С., Гиль А.В., Воронцова Е.С.</p> | <p>6 A stratified method of formalization of multistate complex technological systems
 Balasanyan S.Sh.</p> <p>19 Changes of chemical groundwater composition in the Republic of Altai due to the earthquakes
 Shitov A.V., Kats V.E., Dutova E.M., Molokov V.Yu., Pokrovskiy V.D.</p> <p>30 Using different computing systems to solve the automatic cloud classification problem according to modis satellite data by probabilistic neural network
 Skorokhodov A.V., Aksenov S.V., Aksenov A.V., Laykom D.N.</p> <p>40 Composition and physical properties of the aleuropelitic rocks of Ishim formation (southern part of Tyumen region). Prospects for their industrial application
 Smirnov P.V., Konstantinov A.O., Ivanov K.S.</p> <p>48 On creation of geographic information systems based on hypernetworks for the organization of the engineering infrastructure of modern cities
 Toktoshov G.Y.</p> <p>56 Experimental study of the structural stability of the boiler pipes walls
 Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I.</p> <p>64 Formation of organosilicon compounds in water purification processes
 Kostikova L.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I., Egorov N.B.</p> <p>72 Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment
 Lavrenov E.O.</p> <p>79 Petroleum geology: science and practice in the 21st century. New ideas and paradigms
 Zapivalov N.P.</p> <p>88 Creating a graph model for the diagnosis of the traction motor commutator-brush unit considering thermal factors
 Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Khloptsov A.S., Dolgova A.V.</p> <p>96 Formation of the gas flow in the plasma-chemical reactor
 Myshkin V.F., Khan V.A., Bepala E.V., Tichy M., Izhoykin D.A.</p> <p>105 Monitoring of transfer of the near-bottom flow of the sediments in coastal zone of the shelf to identify the main parameters of the models of the ecosystems
 Ilin V.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Galtsev A.A., Zaripov O.M., Dolgopolov D.V.</p> <p>116 Modeling hydrogeological conditions for antilandslide measures justification on the plot of the Kama river embankment in Perm
 Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I.</p> <p>128 Evaluation of burning conditions of high-humidity non-project fuel in chamber furnace based on numerical simulation
 Taylasheva T.S., Gil A.V., Vorontsova E.S.</p> |
|---|--|

УДК 681.51: 622.73

МЕТОД СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО МНОГИМИ СОСТОЯНИЯМИ

Баласанян Сейран Шамирович,

доктор технических наук, доцент, заместитель директора
по научной работе Капанского филиала Национального политехнического
университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28.
E-mail: seyran@sunicom.net

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки проблемно ориентированного метода иерархической многоуровневой (стратифицированной) формализации, позволяющего преодолеть трудности моделирования сложных технологических систем со многими состояниями при исследовании эффективности их функционирования с учетом влияния надежности элементов.

Цель работы: разработка проблемно ориентированного метода стратифицированной формализации сложных технологических систем определенного класса с пространством состояний большой размерности и его практическое применение при разработке стратифицированной модели технологической системы измельчения руды, учитывающей влияние надежности оборудования на эффективность ее функционирования.

Методы исследования: концепция иерархического многоуровневого описания сложных систем, общая теория систем, теория надежности, метод имитационного моделирования, алгебра логики, методы прикладной статистики.

Результаты. Предложен проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации, позволяющий преодолеть трудности формализации сложных технологических систем определенного класса при исследовании эффективности их функционирования, с учетом надежности элементов, методом имитационного моделирования. С применением предложенного метода разработана компьютерная стратифицированная модель технологической системы измельчения руды Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения), описывающая процесс ее функционирования под воздействием случайного процесса возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования на трех уровнях: на уровне измельчительных агрегатов, измельчительных комплексов и на системном уровне. Применение предложенного метода формализации позволило свести описание технологической системы измельчения руды к описанию ее частей и их сопряжения, предоставляя возможность аналитического описания системы на первом и третьем уровнях. Благодаря этому построение компьютерной модели системы в целом существенно упростилось, объем натурных экспериментов резко сократился, что, в свою очередь, привело к значительному уменьшению сроков и трудоемкости построения компьютерной модели системы в целом.

Ключевые слова:

Надежность, эффективность, страта, модель, граф, измельчение руды.

Введение

Традиционная теория и бинарные модели надежности предполагают, что система и ее элементы могут иметь лишь два возможных состояния – состояние полной работоспособности и состояние полного отказа. Однако в большинстве случаев для современных сложных технических, в частности технологических, систем (СТС) практически невозможно определить общепринятое понятие отказа [1–11], поскольку отказы отдельных элементов могут привести не к полному отказу системы, а лишь к ухудшению качества ее функционирования. Это обусловлено наличием в сложных системах функциональной и структурной избыточности, благодаря чему система обладает свойством реконфигурации (перестроения) структуры и способностью функционировать при отказах элементов с различными уровнями эффективности. Причем определяющим признаком сложной системы, независимо от числа ее элементов и связей между ними, является то, что она и, возможно, ее элементы могут находиться в двух и более работоспособных состояниях, характеризующихся различными уровнями функционирования [1–4]. В современной теории надежности такие системы известны как сложные технические системы, или системы со многими со-

стояниями (СМС) (multistate systems) [1–7]. Примерами СМС могут служить телекоммуникационные [8, 9], энергетические [10, 11], транспортные системы [12, 13], нефтегазодобывающие [14, 15], горнодобывающие и перерабатывающие [16–18] производства.

Для сложных технологических СМС традиционное понятие надежности не является полноценной и исчерпывающей характеристикой, так как существующие показатели надежности учитывают лишь сам факт появления или отсутствия отказов и не дают никакого представления об их влиянии на качество и конечный (выходной) эффект функционирования системы. Поэтому для СМС вместо общепринятого понятия надежности рассматривается эффективность функционирования, оценка и исследование которого производится с помощью показателя, учитывающего влияние надежности элементов системы на качество ее функционирования.

Таким образом, для СМС проблема исследования надежности сводится к исследованию эффективности функционирования с учетом надежности их элементов, а более конкретно – к исследованию влияния показателей надежности элементов системы на показатели эффективности ее функционирования.

Постановка задачи

Проблемы исследования надежности и эффективности сложных систем привлекают все большее внимание специалистов во всем мире. В настоящее время продолжает наблюдаться стремительный рост числа публикаций в этой области.

При инженерном анализе надежности СМС важное значение имеет адекватность математических моделей. Как справедливо отмечает И.А. Ушаков [19], адекватность математической модели надежности реальному техническому объекту гораздо важнее ее математической «строгости». С этой точки зрения имитационные (компьютерные) модели, реалистически отражающие действительность, несомненно, обладают большей степенью адекватности, чем аналитические модели [1–4, 20–22]. Однако построение имитационных моделей для исследования эффективности функционирования СТС с учетом надежности их элементов является довольно сложной и трудоемкой задачей. Иногда разработка таких моделей, как отмечается в [3, 4, 18, 20–23], оказывается более сложной задачей, чем создание самих систем. Именно большая трудоемкость и время разработки модели считаются основными недостатками метода ИМ [3, 4, 18, 20].

Имитационные модели, ориентированные на решение задач исследования эффективности функционирования сложных систем длительного действия с учетом надежности, как правило, представляют собой композицию из трех моделей (рис. 1).

Первая из них предназначена для имитации процесса изменения работоспособности элементов системы $Y^0(t)$, вторая – для имитации процесса функционирования системы $Y^h(t)$ под влиянием процесса $Y^0(t)$, а третья модель служит для формирования значений условного показателя эффективности для реализованных траекторий системы. Наиболее актуальной и чрезвычайно трудной из проблем, встречающихся при построении имитационной модели функционирования исследуемой системы, реализующей отображение $Y^0(t) \rightarrow Y^h(t)$, является преодоление ее сложности, связанной с большой размерностью пространства состояний системы. Действительно, в простом случае, когда элементы моделируемой системы обладают лишь двумя возможными состояниями, уже при количестве элементов, равном 20, число возможных состояний системы превышает 10^6 (предполагается, что состояния системы не поддаются аналитическому описанию). А если иметь в виду случайный характер процесса функционирования исследуемой системы, то для получения статистически устойчивых оценок ее выходных параметров для всевозможных состояний потребуется чрезмерно большой объем натурных экспериментов, проведение которых практически невозможно.

Применение известных методов и способов упрощения имитационных моделей в данном случае либо недопустимо снижает точность моделей и резко ограничивает их возможности, либо не дает

ощутимого эффекта. В связи с этим возникает необходимость применения качественно новых и более эффективных подходов, позволяющих при исследовании эффективности функционирования современных СТС методом имитационного моделирования успешно преодолеть их большую размерность, а также сократить сроки и уменьшить трудоемкость построения имитационных моделей.



Рис. 1. Общий вид компьютерной модели, ориентированной на исследование эффективности функционирования СТС

Fig. 1. General view of a computer model, oriented to study of the functioning efficiency of CTS

Одним из возможных путей решения указанных выше проблем является применение концепции иерархического многоуровневого (стратифицированного) описания систем [24]. Ее сущность состоит в том, что исследуемая сложная система с произвольной структурой описывается не одной моделью типа «вход-выход» большой размерности, а иерархией относительно несложных моделей S^μ , $\mu \in I = \{1, 2, \dots, k\}$, каждая из которых описывает поведение одной и той же системы с точки зрения определенного уровня абстрагирования (детализации). Стратифицированное описание объекта предусматривает его вертикальную (на уровне) и горизонтальную декомпозиции на подсистемы различных уровней, построение моделей отдельных подсистем с учетом их взаимосвязей и последующий синтез из них модели объекта в виде иерархической многоуровневой системы.

Однако современный уровень развития теории иерархических многоуровневых систем пока не

предоставляет возможность ее широкого практического применения при исследовании эффективности функционирования СТС с учетом надежности их элементов из-за чрезмерно высокого уровня общности и формализации изложенных принципов и теоретических положений. В связи с этим возникает практическая необходимость в разработке конкретного метода стратифицированной формализации, ориентированной на анализ эффективности функционирования СТС с учетом надежности их элементов.

Проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации

В настоящей работе предлагается проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации, позволяющий преодолеть трудности формализации СТС определенного класса, для которых приемлемы следующие предположения:

1. На каждом μ -м уровне описания (страте) рассматриваемая система, представленная в виде совокупности взаимосвязанных подсистем ($\mu-1$ -го уровня или элементов (на первой страте), может быть разбита на конечное число подсистем μ -го уровня.
2. Состояние каждой подсистемы любого уровня и самой системы, рассматриваемой как одно целое, характеризуется упорядоченной совокупностью выходных характеристик, определяющих качество их функционирования. Состояние системы на каждом уровне описания рассматривается как упорядоченная совокупность состояний ее подсистем соответствующего уровня.
3. Воздействие внешних по отношению к рассматриваемой системе факторов непосредственно воспринимается элементами системы и может привести к изменению их работоспособности.
4. На любом μ -м уровне описания (кроме первого) состояние каждой подсистемы μ -го уровня в данный момент времени непосредственно зависит от состояний определенных, в том числе входящих в ее состав подсистем ($\mu-1$ -го уровня). Следовательно, на каждой μ -й страте подсистемы μ -го уровня взаимодействуют между собой только через входящие в их состав подсистемы ($\mu-1$ -го уровня).
5. Состояние каждой подсистемы первого уровня в данный момент времени однозначно определяется работоспособностью входящих в ее состав элементов и элементов других подсистем, влияющих на ее работоспособность в этот момент времени.

Заметим, что сформулированные предположения, лежащие в основе многих широко применяемых моделей, ориентированных на исследование надежности и эффективности функционирования сложных систем, могут быть приемлемы для достаточно широкого класса СТС со многими состояниями.

Суть предлагаемого метода формализации заключается в следующем.

1. Исходя из характера решаемых на модели задач, удобства описания и сложности рассматриваемой системы, предварительно выбираются уровни описания (страты). При этом, с целью обеспечения простоты описания и гибкости модели, в обязательном порядке предусматриваются страты, на которых происходит реконфигурация структуры системы. Если условия поставленных задач позволяют, то желательно выбрать такие страты, на которых функционирование отдельных подсистем моделируемой системы поддается аналитическому описанию.
2. Составляется словесное качественное описание последствий изменения выходных характеристик элементов системы примерно в такой форме: изменение характеристик элемента E_i^0 вызывает изменение выходных характеристик элемента E_j^0 (или состояния элемента E_j^0) зависит от состояния элемента E_i^0). На основании этого описания строится формализованная структурная схема системы в виде орграфа $G^0(E^0, V^0)$, отражающего взаимное влияние элементов $E_i^0, i \in I^0 = \{1, 2, \dots, p_0\}$ в системе. Вершины графа G^0 соответствуют элементам системы, а дуги – связям между ними.

Система, заданная графом G^0 , разбивается на подсистемы первого уровня $E_i^1, i \in I^1 = \{1, 2, \dots, p_1\}$. При этом соблюдаются следующие условия:

$$E_i^1 = \{E_k^0 : k \in I_i^0 \subset I^0\}, \bigcup_{i \in I^1} E_i^1 = E^0,$$

$$E_i^1 \cap E_j^1 = \emptyset, i \in I^1, j \in I^1, i \neq j.$$

Далее в качестве компонентов моделируемой системы рассматриваются подсистемы первого уровня, т. е. производится укрупнение элементов системы в соответствии с проведенной декомпозицией. Затем вышеизложенным способом составляется словесное качественное описание взаимного влияния подсистем $E_i^1, i \in I^1$ в системе, на основании чего строится формализованная структурная схема системы в виде орграфа $G^1(E^1, V^1)$ с множеством вершин $E^1 = \{E_i^1, i \in I^1\}$. Далее система, заданная орграфом G^1 , разбивается на более крупные подсистемы второго уровня $E_i^2, i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$ с соблюдением следующих условий:

$$E_i^2 = \{E_k^1 : k \in I_i^1 \subset I^1\}, \bigcup_{i \in I^2} E_i^2 = E^1,$$

$$E_i^2 \cap E_j^2 = \emptyset, i \in I^2, j \in I^2, i \neq j.$$

Процедура многократного разбиения системы на подсистемы различных уровней продолжается до последнего k -го уровня описания, на котором система рассматривается как одно целое – крупная подсистема. Заметим, что на каждой μ -й страте разбиение системы, представленной в виде совокупности взаимосвязанных подсистем ($\mu-1$ -го уровня, на подсистемы μ -го уровня эквивалентно

разбиению оргграфа $G^{\mu-1}$ на подграфы G_i^{μ} , $i \in I^{\mu} = \{1, 2, \dots, p_{\mu}\}$ со множеством вершин E_i^{μ} , $i \in I^{\mu}$. На каждой μ -й страте на основании разбиения оргграфа $G^{\mu-1}$ на подграфы строится двухуровневый оргграф (двудольный граф или биграф) $G^{\mu}(E^{\mu}, V^{\mu})$, отражающий взаимное влияние подсистем μ -го уровня, осуществляемое через входящие в их состав подсистемы $(\mu-1)$ -го уровня.

Каждый ориентированный биграф $\hat{G}^{\mu}$ строится следующим образом. Пусть система на μ -й страте задана оргграфом $G^{\mu-1}$ (рис. 2) со множеством вершин $E^{\mu-1} = \{E_i^{\mu-1} : i \in I^{\mu-1}\}$ и множеством дуг $V^{\mu-1}$. Фиксируем некоторое разбиение $E^{\mu} = \{E_i^{\mu} : i \in I^{\mu}\}$ множества вершин $E^{\mu-1}$. Множество дуг $V^{\mu-1}$ графа $G^{\mu-1}$ также распадается на $(p_{\mu}+1)$ попарно непересекающихся подмножеств: а) подмножество внутренних дуг, соединяющих вершины из одной и той же E_i^{μ} ; б) подмножество внешних дуг, соединяющих вершины из разных E_i^{μ} .

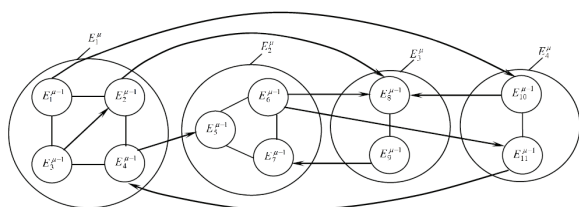


Рис. 2. Разбиение системы на подсистемы μ -го уровня

Fig. 2. Splitting of system into first level subsystems

Данному фиксированному разбиению E^{μ} ставится в соответствие двухуровневый оргграф $G^{\mu}(E^{\mu}, V^{\mu})$ (рис. 3) с множеством вершин:

$$\hat{E}^{\mu} = E^{\mu-1} \cup E^{\mu} = \{E_i^{\mu-1} : i = \overline{1, p_{\mu-1}}\} \cup \{E_j^{\mu} : j = \overline{1, p_{\mu}}\}.$$

Причем вершины $E_i^{\mu-1}$, $i \in I^{\mu-1}$ располагаются на первом уровне, а вершины E_j^{μ} , $j \in I^{\mu}$ – на втором. Вершины одного и того же уровня друг с другом не связаны. Дуги, соединяющие вершины первого и второго уровней, определяются следующим образом: из вершины $E_i^{\mu-1}$ в вершину E_j^{μ} идет дуга, когда $E_i^{\mu-1} \in E_j^{\mu}$ или когда в графе имеется дуга, направленная от вершины $E_i^{\mu-1}$ в некоторую вершину из E_j^{μ} . Однонаправленные параллельные дуги сливаются. Путем последовательной композиции построенных биграфов G^{μ} , $\mu \in I$, отождествляя вер-

шины второго уровня каждого биграфа $\hat{G}^{\mu-1}$ и соответствующие вершины первого уровня биграфа G^{μ} , снизу вверх строится иерархический k -уровневый оргграф $G(E, V)$ (рис. 4), где вершина E_1^k соответствует системе, рассмотренной как одно целое. Множества вершин и дуг оргграфа G определяются следующими соотношениями:

$$E = \bigcup_{i=1}^k \hat{E}^i, V = \bigcup_{i=1}^k \hat{V}^i.$$

3. На каждой μ -й страте на основании содержательного описания выделенных подсистем μ -го уровня проводится формализация их функционирования, в результате чего для каждой подсистемы E_i^{μ} строится ее математическая модель S_i^{μ} . При этом, согласно принятым предположениям, в качестве выходного сигнала каждой подсистемы μ -го уровня рассматривается совокупность ее выходных характеристик, а в качестве входного сигнала – совокупность соответствующих выходных характеристик тех подсистем $(\mu-1)$ -го уровня, которые в графе $G(E, V)$ или в биграфе G^{μ} соединены с данной подсистемой дугами.

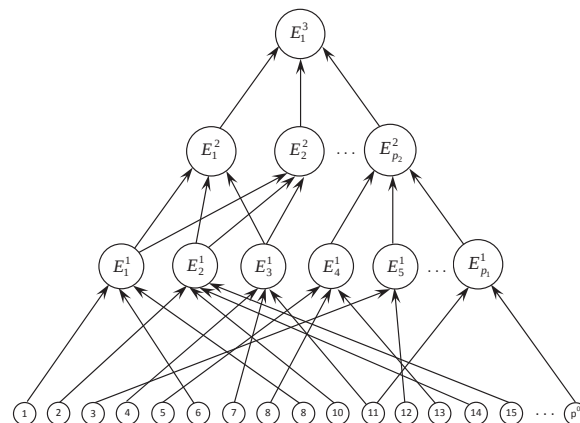


Рис. 4. Граф $G(E, V)$

Fig. 4. Graph $G(E, V)$

Принципиальной особенностью предложенного метода формализации, выгодно отличающегося от общей концепции стратифицированного описа-

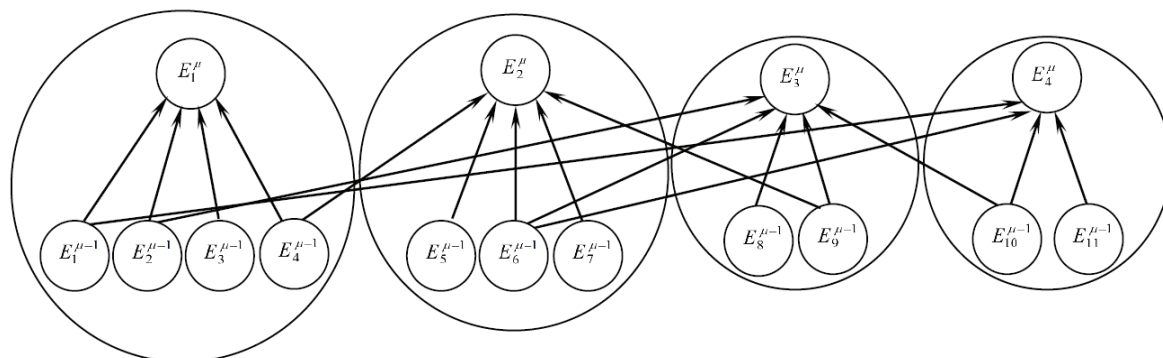


Рис. 3. Двухуровневый оргграф (биграф) $\hat{G}^{\mu}$

Fig. 3. Split level digraph $\hat{G}^{\mu}$

ния, является то, что на каждом μ -м уровне описания взаимодействие между подсистемами μ -го уровня рассматривается как взаимодействие входящих в их состав подсистем $(\mu-1)$ -го уровня, которое осуществляется в иерархической многоуровневой модели посредством передачи сигналов элементов $(\mu-1)$ -й страты соответствующим элементам μ -й страты. Таким образом, на каждой μ -й страте описывается поведение подсистем μ -го уровня с точки зрения их внутреннего механизма, откладывая описание их взаимодействия, как компонентов системы, для $(\mu+1)$ -й страты. Благодаря проведению такой формализации, несмотря на вполне адекватное отражение структуры связей между элементами и подсистемами реальной системы (рис. 3, 5), элементы каждой страты иерархической модели оказываются несвязанными между собой.

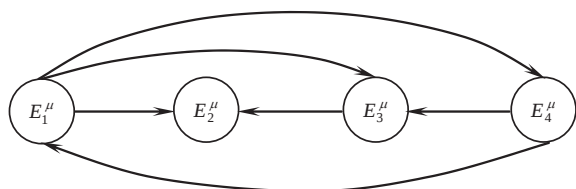


Рис. 5. Взаимосвязи подсистем μ -го уровня, реализованные посредством подсистем $(\mu-1)$ -го уровня

Fig. 5. Links between μ -th level subsystems, implemented through subsystems $(\mu-1)$ -th level

Таким образом, в результате проведенной формализации исследуемая система с произвольной структурой представлена в виде иерархической многоуровневой модели. Придерживаясь терминологии, примененной в [24], данная модель названа строго иерархической стратифицированной системой (СИСС) [25], а уровни детализации, включающие стратифицированное описание, – стратами. Каждая страта S^μ СИСС представляет собой упорядоченную совокупность несвязанных между собой элементов S_i^μ , $i \in I^\mu$, $\mu \in I$, каждый из которых представляет собой временную статическую систему без памяти [26].

Как математический объект каждый элемент S_i^μ характеризуется множествами моментов времени T_i^μ , входных сигналов X_i^μ , выходных сигналов Y_i^μ и оператором H_i^μ , реализующим отображение $X_i^\mu \rightarrow Y_i^\mu$. Входные и выходные сигналы являются функциями времени; их значения в момент времени $t \in T_i^\mu$ обозначаются $x_i^\mu(t)$ и $y_i^\mu(t)$ соответственно. Функционирование каждого элемента S_i^μ при заданных множествах T_i^μ , X_i^μ и Y_i^μ полностью детерминировано и описывается однозначным оператором $y_i^\mu(t) = H_i^\mu(x_i^\mu(t))$.

Взаимодействие между элементами СИСС, а также между ней и внешней средой осуществляется путем обмена сигналами. В соответствии с графом $G(E, V)$ структуру связей между элементами СИСС качественно, без указания содержания сигналов, можно представить в виде ориентированного графа (рис. 6).

Разработана математическая модель сопряжения элементов в СИСС [25, 27], позволяющая свести имитацию сопряжения элементов смежных страт к стандартной операции умножения матриц, что предоставляет возможность легко переходить к различным модификациям компьютерной модели системы в процессе имитационного эксперимента, требуя при этом небольшого объема перепрограммирования.

СИСС свойственны следующие характерные особенности, с помощью которых ее можно выделить из общего класса стратифицированных систем: взаимодействие между СИСС и внешней средой осуществляется исключительно через первую и последнюю страты, число элементов страт уменьшается по мере продвижения вверх по иерархии, наивысшая страта состоит из одного элемента, элементы любой страты не связаны между собой и могут принимать только сигналы, выдаваемые элементами непосредственно нижерасположенной страты, чем и обусловлена строго иерархическая конфигурация структуры СИСС.

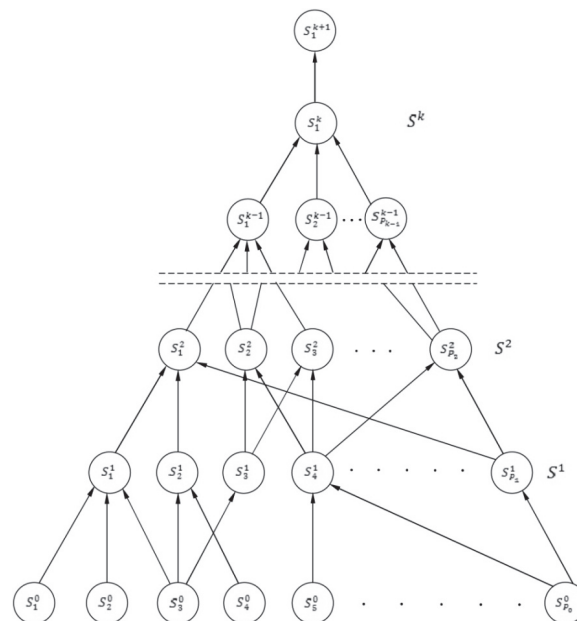


Рис. 6. Структура СИСС

Fig. 6. Structure of a stratified model

В соответствии с предложенной стратифицированной формализацией каждый элемент S_i^μ описывает зависимость состояния подсистемы μ -го уровня E_i^μ от состояний входящих в ее состав или влияющих на ее функционирование подсистем $(\mu-1)$ -го уровня. Другими словами, каждый элемент S_i^μ описывает поведение соответствующей подсистемы μ -го уровня в зависимости от поведения определенных подсистем $(\mu-1)$ -го уровня. В целом каждая страта S^μ описывает поведение моделируемой системы, состоящей из подсистем μ -го уровня, в зависимости от поведения подсистем $(\mu-1)$ -го уровня. Наивысшая страта S^k описывает зависимость состояния системы от состояний ее подсистем E_i^{k-1} , $i=1, k-1$.

Таким образом, на каждой μ -й страте описывается поведение подсистем μ -го уровня с точки зрения их внутреннего механизма.

В отличие от стратифицированной системы общего класса, которая является универсальной, многоцелевой моделью сложных систем, СИСС, являясь проблемно ориентированной моделью, отображает только те аспекты функционирования моделируемой системы, которые связаны с изменением работоспособности ее элементов и подсистем. Это дает СИСС ряд очевидных преимуществ по сравнению со стратифицированной системой общего класса, в частности позволяет разработать довольно удобную, легко реализуемую на компьютерах математическую модель сопряжения ее элементов и распараллеливать процесс имитации каждой стратегии. СИСС обладает основными достоинствами, присущими стратифицированным системам. В то же время, благодаря проблемной ориентации и применению предложенного метода формализации, она достаточно проста и удобна для практического пользования.

СИСС, как обобщенная математическая модель, обладает достаточной универсальностью относительно определенного класса реальных систем, для которых приемлемы сформулированные ранее предположения. Ее использование в качестве математической схемы формализации позволяет свести описание исследуемой сложной системы к описанию ее частей и их сопряжению, нередко предоставляя возможность применения при этом аналитических методов. Благодаря этому удается преодолеть трудности формального описания СТС с пространством состояний большой размерности.

Практическое применение предложенного метода формализации

Предложенный метод формализации был использован при разработке стратифицированной компьютерной модели технологической системы измельчения руды (ТСИР) Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения), укрупненная структурная схема которой приведена на рис. 7. ТСИР состоит из 10 измельчительных комплексов (ИК), включающих измельчительные агрегаты (А, АС), работающие по одностадийной или двухстадийной схеме измельчения с соотношением мельниц 2:1, 1:1, и грунтовые насосы (ГН). Каждый измельчительный агрегат состоит из шаровой мельницы или мельницы самоизмельчения (АС), работающей со спиральным классификатором или с батареей гидроциклонов. При отказах оборудования происходит реконфигурация структуры ТСИР с использованием резервных связей (показаны пунктиром).

Учитывая характер поставленных задач, удобство описания, а также конструктивные и функциональные особенности ТСИР, ее функционирование описано на трех следующих стратегиях (уровнях описания): страте измельчительных агрегатов

(ИА), страте измельчительных комплексов и системной стратегии.

В результате применения предложенной формализации построен трехуровневый граф $G(E, V)$, на основе которого построены модели S_i^μ , $i \in I^\mu$, $\mu \in I = \{1, 2, 3\}$ подсистем различных уровней: S_i^μ , $i \in I^\mu$, $\mu \in I$, и модель их сопряжения.

Страта измельчительных агрегатов

На данной страте ТСИР представлена совокупность измельчительных агрегатов – подсистем первого уровня E_i^1 , $i \in I^1 = \{1, 2, \dots, 32\}$, полученных в результате декомпозиции системы, состоящей из элементов E_i^0 , $i \in I^0 = \{1, 2, \dots, 86\}$.

Каждая подсистема E_i^1 первого уровня рассмотрена как объект с двумя возможными состояниями и формализована в виде временной статической системы без памяти S_i^1 , описываемой множествами X_i^1 , Y_i^1 , T_i^1 и оператором H_i^1 . Множество X_i^1 входных сигналов определяется из графа $G(E, V)$ как декартово произведение множеств $\{0; 1\}$ выходных сигналов входящих в состав элементов E_j^0 , $j \in I^0$, элементов других подсистем, влияющих на работоспособность подсистемы E_i^1 . Множество Y_i^1 выходных сигналов включают два элемента (0 – состояние отказа, 1 – работоспособное состояние). Оператор H_i^1 представляет собой логическую функцию работоспособности подсистемы E_i^1 , описывающую условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав элементов.

Ниже приведены аналитические выражения операторов H_i^1 , $i = \{1, 2, \dots, 5\}$ (t упущено) для первых 5 подсистем E_i^1 :

$$y_1^1 = H_1^1(x_1^1) = x_{1,1}^1 \wedge x_{2,1}^1 \wedge x_{3,1}^1;$$

$$y_2^1 = H_2^1(x_2^1) = x_{2,1}^1 \wedge x_{2,2}^1;$$

$$y_3^1 = H_3^1(x_3^1) = x_{3,1}^1 \wedge x_{3,2}^1;$$

$$y_4^1 = H_4^1(x_4^1) = x_{4,1}^1 \wedge x_{4,2}^1 \wedge x_{4,3}^1;$$

$$y_5^1 = H_5^1(x_5^1) = x_{5,1}^1 \wedge x_{5,2}^1 \wedge x_{5,3}^1.$$

Случайный процесс $Y_i^1(t)$ изменения состояний каждой подсистемы E_i^1 , вследствие изменения работоспособности элементов E_j^0 , $j \in I^0$, рассматривается как формализованный процесс ее функционирования на первой страте.

Страта измельчительных комплексов

На этой страте ТСИР представлена в виде совокупности $p_2=10$ измельчительных комплексов – подсистем второго уровня E_i^2 , $i \in I^2 = \{1, 2, \dots, p_2\}$. Каждый ИК, в зависимости от работоспособности входящих в его состав или влияющих на его работу ИА, может работать в одном из технологически возможных режимов по определенной схеме измельчения. Каждый режим работы ИК E_i^2 характеризуется конкретным набором значений его выходных характеристик $y_i^2 = (y_{i,1}^2, y_{i,2}^2, y_{i,3}^2)$, где $y_{i,1}^2$ – производительность комплекса, $y_{i,2}^2$ – процентное

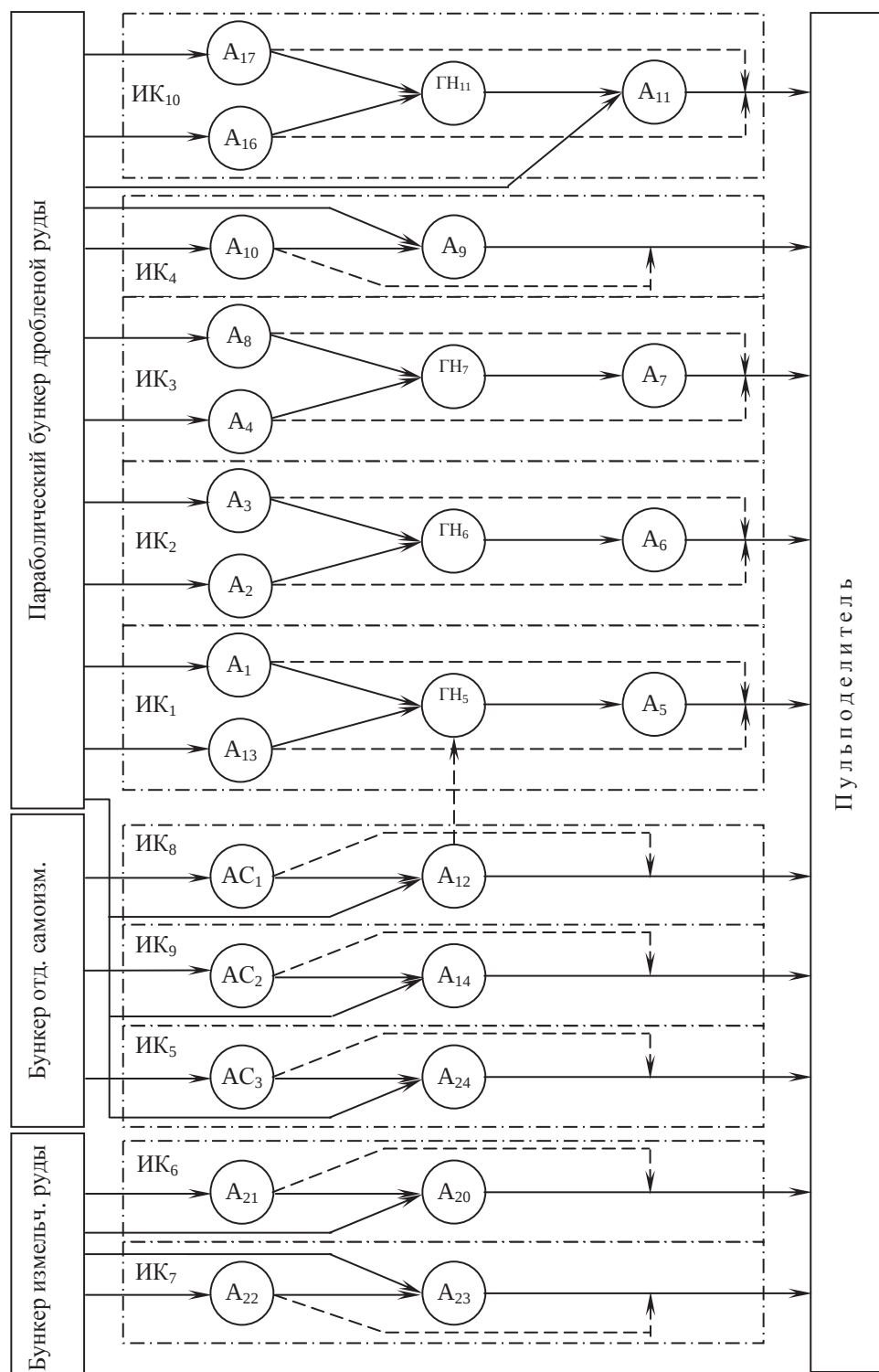


Рис. 7. Укрупненная структурная схема ТСИР

Fig. 7. Enlarged structural diagram of OGTS

содержание класса ≤ 80 мкм в измельченном продукте (пульпе), $y_{i,3}^2$ – плотность выходной пульпы.

Обозначим через $x_i^2(t) = (x_{i,1}^2(t), x_{i,2}^2(t), \dots, x_{i,n_i}^2(t))$ совокупность выходных характеристик состояний в момент t тех ИА, от работоспособности которых зависит выбор структуры и режима работы ИК E_i^2 .

В каждый момент $t \in T^1$, когда происходит изменение работоспособности ИА, в соответствии со значением вектора $x_i^2(t)$ происходит перестроение структуры комплекса E_i^2 и переход в новый режим работы, характеризуемый новым значением вектора $y_i^2(t)$.

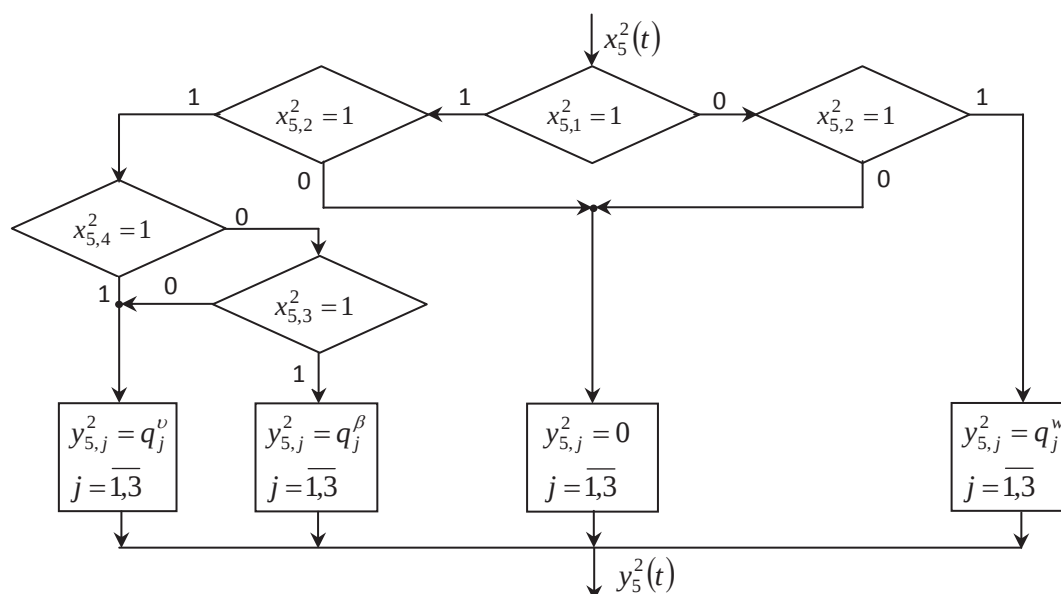


Рис. 8. Структура оператора H_5^2

Fig. 8. Structure of the operator H_5^2

Каждый ИК E_i^2 формализован в виде временной статической системы без памяти S_i^2 , характеризующейся множествами T_i^2 , X_i^2 , Y_i^2 и оператором H_i^2 . В соответствии с формальным описанием СИСС каждое множество T_i^2 , $i \in I^2$ совпадает с множеством $T^1 = T^0$ (множество моментов изменения состояний элементов E_i^0 , $i \in I^0 = \{1, 2, \dots, p_0\}$). Входной сигнал $x_i^2(t)$ каждой E_i^2 представляет собой упорядоченную совокупность выходных сигналов соответствующих подсистем первого уровня. В качестве выходного сигнала любого элемента E_i^2 рассматривается вектор выходных характеристик $y_i^2(t) = (y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$ соответствующей подсистемы (ИК) E_i^2 . Множество Y_i^2 элемента S_i^2 представляет собой совокупность значений вектора выходных характеристик подсистемы E_i^2 , соответствующих всевозможным режимам ее работы. Каждый оператор H_i^2 , реализующий отображение $X_i^2 \rightarrow Y_i^2$, представляет собой бинарную поисковую признаковую структуру – алгоритм, который по заданному входному сигналу $x_i^2(t) \in X_i^2$, описывающему работоспособность входящих в состав подсистемы

стемы E_i^2 и влияющих на ее функционирование подсистем первого уровня, осуществляет поиск и выдачу соответствующего выходного сигнала $y_i^2(t) \in Y_i^2$. На рис. 8 приведена структура одного из десяти операторов H_i^2 .

Среднестатистические значения выходных характеристик $y_i^2(t) = (y_{i,1}^2(t), y_{i,2}^2(t), y_{i,3}^2(t))$ измельчительных комплексов для всевозможных режимов работы подсистемы E_5^2 приведены в таблице.

Системная страта

На данной страте ТСИР рассматривается как одна крупная подсистема E_1^3 третьего уровня, представляющая собой смеситель (пульподелитель), входом которого является совокупность выходных продуктов всех измельчительных комплексов, а выходом – объединенная выходная пульпа, поступающая на флотацию.

Обозначим через $y_{1,1}^3(t)$, $y_{1,2}^3(t)$, $y_{1,3}^3(t)$ значения выходных характеристик подсистемы E_1^3 в момент времени t : ее производительность, процентное содержание класса ≤ 80 мкм и плотность объединен-

Таблица. Схемы измельчения и режимы работы подсистемы E_5^2

Table. Schemes and grinding modes of the subsystem E_5^2

Режимы работы Operation modes	Технологически возможные схемы измельчения Technologically possible grinding schemes		Среднестатистические значения выходных характеристик Average values of the output characteristics		
	Схема измельчения Scheme of grinding	Сопряжение мельниц Conjugation of mills	Производ. по исх. руде (т/ч) Original ore productivity (t/h)	Содержание класса ≤ 80 мкм в вых. пульпе Content of class $\leq 80 \mu\text{m}$ in output pulp	Плотность выходной пульпы (г/л) Density of the output pulp (g/l)
v	2-стадийный 2-stage	(1:1), $A_{24} \rightarrow AC_3$	$q_1^v = 126,7$	$q_2^v = 56,3$	$q_3^v = 1344,7$
w	1-стадийный 1-stage	(1:0), AC_3	$q_1^w = 80$	$q_2^w = 56,3$	$q_3^w = 1273,3$
β	2-стадийный 2-stage	(2:1), $A_{14} \rightarrow AC_3 \leftarrow A_{24}$	$q_1^\beta = 130$	$q_2^\beta = 56,3$	$q_3^\beta = 1344$

ной пульпы. Соответствующие характеристики входных потоков, представляющие собой выходные характеристики ИК, обозначим через $x_{i,1}^3(t)=y_{i,1}^2(t)$, $x_{i,2}^3(t)=y_{i,2}^2(t)$, $x_{i,3}^3(t)=y_{i,3}^2(t)$, $i \in I^2$.

Показано [25], что общая производительность ТСИР $y_{1,1}^3(t)$, процент содержания класса ≤ 80 мкм $y_{1,2}^3(t)$ в объединенной пульпе и ее плотность $y_{1,3}^3(t)$ связаны с характеристиками отдельных комплексов следующими соотношениями:

$$y_{1,1}^3(t) = H_{1,1}^3(x_{1,1}^3(t), x_{1,2}^3(t), \dots, x_{1,10}^3(t)) = \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t); \quad (1)$$

$$y_{1,2}^3(t) = H_{1,2}^3(x_{1,1}^3(t), \dots, x_{1,20}^3(t)) = \left[\sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t) \cdot x_{1,(i+10)}^3(t) \right] / \sum_{i=1}^{10} x_{1,i}^3(t), \quad (2)$$

$$y_{1,3}^3(t) = H_{1,3}^3(x_{1,1}^3(t), x_{1,2}^3(t), \dots, x_{1,10}^3(t), x_{1,20}^3(t), \dots, x_{1,30}^3(t)) = \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t) \cdot x_{1,(i+20)}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000} \right] / \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{1,i}^3(t)}{x_{1,(i+20)}^3(t) - 1000}. \quad (3)$$

Соотношения (1), (2) и (3) соответственно описывают операторы $H_{1,1}^3$, $H_{1,2}^3$, $H_{1,3}^3$, составляющие оператор H_1^3 , который реализует отображение $X_1^3 \rightarrow Y_1^3$.

На основании графа $G(E, V)$ и формальных описаний элементов S_i^μ , $i \in I^\mu$, $\mu \in I$ составлена блок-схема модели ТСИР (рис. 9) с выделением входов, выходов элементов и с указанием элементарных каналов связи между ними. На основании блок-схемы модели ТСИР построена математическая модель сопряжения ее элементов, описывающая структуру связей между элементами, и компьютерная модель системы в целом с использованием языка C++.

Таким образом, в результате проведенной формализации ТСИР представляется в виде трехуровневой строго иерархической стратифицированной системы. По мере продвижения вверх по иерархии происходит фазовое укрупнение и агрегирование характеристик состояний системы. Чем выше расположена страта, тем более обобщенными переменными описывается функционирование системы. Чем ниже спускаемся по иерархии, тем более детальным становится описание системы. Компоненты системы, являющиеся ее подсистемами на данной страте, более подробно раскрываются на нижних стратах. Обращаясь к нижним стратам, можно детально объяснить поведение отдельных подсистем при отказах элементов системы. С другой стороны, чем выше поднимаемся, тем яснее становится последствие влияния отказов элементов системы на качество ее функционирования. На каждой страте выявляются новые свойства системы и связи между ее подсистемами, которые не существуют на других стратах.

Разработанная модель ТСИР в составе общей модели системы (рис. 1) использована для решения ряда прикладных задач, связанных с оценкой и исследованием эффективности функционирования ТСИР ЗММК [25] с учетом надежности ее оборудования. Эта модель используется также в составе компьютерной модели для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовой руды ЗММК [28].

Применение предложенного метода стратифицированной формализации при разработке модели ТСИР позволяет существенно упростить построение ее компьютерной модели по сравнению с традиционно используемой моделью типа «вход-выход», значительно уменьшить трудоемкость и сроки разработки модели, свести имитацию сопряжения элементов смежных страт к стандартной операции умножения матриц, что предоставляет возможность легко переходить к различным модификациям компьютерной модели системы в процессе имитационного эксперимента, требуя при этом небольшого объема перепрограммирования.

Выводы

С применением стратифицированного подхода разработан проблемно ориентированный метод формализации, позволяющий: преодолеть сложность формализации определенного класса СТС с пространством состояний большой размерности при исследовании эффективности их функционирования с учетом надежности элементов; распараллеливать процесс имитации функционирования элементов каждой страты при реализации модели на многопроцессорных компьютерах; разработать удобную модель сопряжения их элементов, реализующую имитацию сопряжения элементов смежных страт посредством стандартной операции умножения матриц, что предоставляет возможность легко переходить к различным модификациям компьютерной модели системы в процессе имитационного эксперимента.

Практическое применение предложенного метода формализации позволило свести описание ТСИР к описанию ее частей и их сопряжения, предоставляя возможность аналитического описания системы на первой и третьей стратах. Благодаря этому построение компьютерной модели системы в целом существенно упростилось, объем натурных экспериментов, необходимых для построения модели ТСИР, резко сократился, что, в свою очередь, привело к значительному уменьшению сроков и трудоемкости построения компьютерной модели системы в целом.

Применение построенной стратифицированной модели ТСИР позволяет решить широкий круг прикладных задач оценки и анализа эффективности ее функционирования на различных уровнях детализации с учетом влияния надежности оборудования.

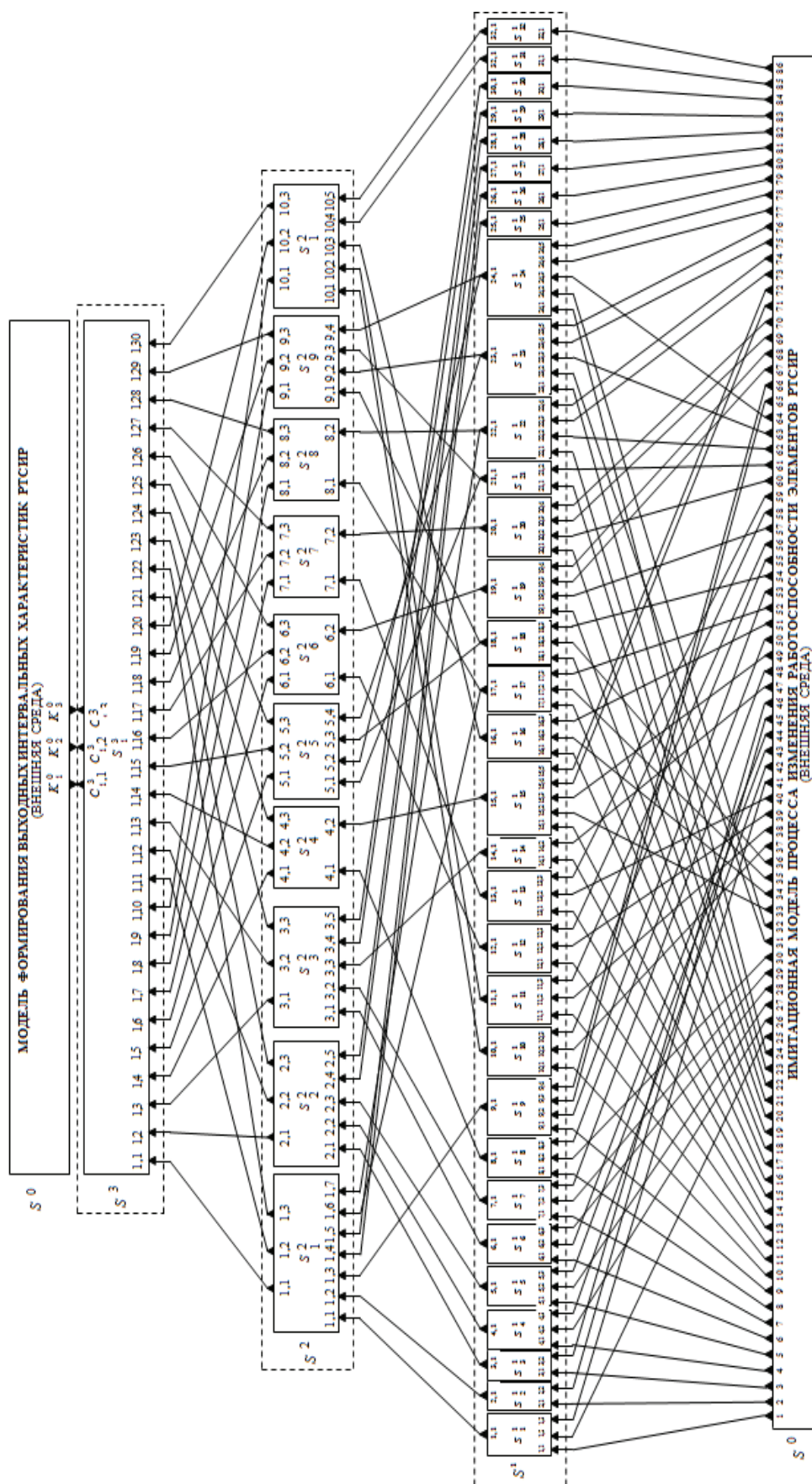


Рис. 9. Блок-схема стратифицированной модели ТСИР

Fig. 9. Block diagram of a stratified model of TSOG

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levitin G., Frenkel I., Dong Y. Multi-state system reliability analysis and optimization for engineers and industrial managers. – London: Springer-Verlag, 2010. – 393 p.
2. Ushakov I. Probabilistic reliability models. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2012. – 248 p.
3. Lisnianski A., Levitin G. Multi-state system reliability: assessment, optimization and application. – Singapore: World Scientific, 2003. – 358 p.
4. Kołowrocki K., Soszyńska-Budny J. Reliability and safety of complex technical systems and processes. Modeling – Identification – Prediction – Optimization. – London: Springer Series in Reliability Engineering, 2011. – 405 p.
5. Bayesian modeling of multi-state hierarchical systems with multi-level information aggregation / Mingyang Li, Jian Liu, Jing Li, Byoung Uk Kim // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – V. 124. – P. 158–164.
6. Yu H., Yang J., Mo H. Reliability analysis of repairable multi-state system with common bus performance sharing // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – V. 132. – P. 90–96.
7. Yong L., Anxin L., Xiaonan Z. Complex multi-state system reliability modeling and assessment // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). – 2012. – V. 4. – № 9. – P. 4260–4267.
8. Optimal structure of multi-state systems with multi-fault coverage / R. Peng, H. Mo, M. Xie, G. Levitin // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – V. 119. – P. 18–25.
9. Yeh W.-C., Bae C., Huang C.-L. A new cut-based algorithm for the multi-state flow network reliability problem // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – V. 136. – P. 1–7.
10. Eryilmaz S. Dynamic assessment of multi-state systems using phase-type modeling // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – V. 140. – P. 71–77.
11. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit / A. Lisnianski, D. Elmakias, D. Laredo, H. Ben-Haim // Reliability Engineering & System Safety. – 2012. – V. 98. – P. 1–6.
12. Component state-based integrated importance measure for multi-state systems / S. Shubin, G. Levitin, D. Hongyan, S. Shudong // Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – V. 116. – P. 75–83.
13. Levitin G., Yeh W.-C., Dai Y. Minimizing bypass transportation expenses in linear multistate consecutively-connected systems // IEEE Transactions on Reliability. – 2014. – V. 63 (1). – P. 230–238.
14. Praks P., Kopustinskias V., Masera M. Probabilistic modeling of security of supply in gas networks and evaluation of new infrastructure // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – V. 144. – P. 254–264.
15. Li Y.F., Peng R. Availability modeling and optimization of dynamic multi-state series – parallel systems with random reconfiguration // Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – V. 127. – P. 47–57.
16. Abou C. Performance assessment of multi-state systems with critical failure modes: application to the flotation metallic arsenic circuit // Reliability Engineering & System Safety. – 2010. – V. 95. – Iss. 6. – P. 614–622.
17. Ahmadi-Javid A., Malhame R.P. Optimal control of a multistate failure-prone manufacturing system under a conditional value-at-risk cost criterion // J. Optimization Theory and Applications. – 2015. – № 167 (2). – P. 716–732.
18. Malinowski J. A Monte Carlo method for estimating reliability parameters of a complex repairable technical system with inter-component dependencies // IEEE Transactions on Reliability. – 2013. – V. 62. – Iss. 1. – P. 256–266.
19. Ушаков И. О важности адекватных математических моделей при инженерном анализе надежности // Надежность. – 2011. – № 3 (38). – С. 3–15.
20. Ushakov I. Optimal redundancy allocation. With practical statistical applications and theory. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2013. – 256 p.
21. Law M.A., Kelton W.D. Simulation modeling and analysis. – 4th ed. – Boston: McGraw-Hill, 2007. – 768 p.
22. Byoung Kyu Choi, Dong Hun Kang. Modeling and simulation of discrete event systems. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2013. – 432 p.
23. Kaizer J.S., Heller A.K., Oberkampf W.L. Scientific computer simulation review // Reliability Engineering & System Safety. – 2015. – V. 138. – P. 210–218.
24. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
25. Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
26. Месарович М., Такахара И. Общая теория систем: математические основы. – М.: 1978. – 311 с.
27. Баласанян С.Ш. Компьютерная модель сопряжения элементов в строго иерархической стратифицированной системе // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 14–19.
28. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.

Поступила 11.11.2015 г.

UDC 681.51: 622.73

A STRATIFIED METHOD OF FORMALIZATION OF MULTISTATE COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Seyran Sh. Balasanyan,

Kapan branch of National Polytechnic University of Armenia,
28, Baghaberd Street, Kapan, 3307, Armenia. E-mail: seyran@sunicom.net

The relevance of the discussed issue is caused by the need to develop a problem-oriented method of hierarchical multilevel (stratified) formalization which allows to overcome the difficulties of modeling multistate complex technological systems in studying the efficiency of their functioning, taking into account the impact of elements reliability.

The main aim of the study: development of a problem-oriented stratified method of formalization of complex technological systems of a certain class with a large dimension of state space and its practical application in the development of a stratified model of technological system of ore grinding, with due consideration of the impact of equipment reliability on its functioning efficiency.

The methods used in the study: concept of multilevel hierarchical description of complex systems, general theory of systems, theory of reliability, simulation method, algebra of logic, methods of applied statistics.

The results. The authors proposed a problem-oriented method of stratified formalization which allows to overcome the difficulties of formalizing CTS of a certain class in the study of efficiency of their functioning taking into account the reliability of components by simulation modeling. By using the proposed method the authors developed a stratified computer model of ore grinding of Zangezur Copper Molybdenum Combine (Armenia), describing the process of its functioning under the influence of the random process of failures and recovery of failed equipment at three levels: at the level of grinding aggregates, at the level of grinding complexes and at the system level. Application of the proposed method of formalizing allowed to reduce the description of ore grinding technological system to the description of its parts and their conjugation, giving the possibility of analytical description of the system at the first and third levels. Thanks to this the construction of a simulation model of the overall system can be substantially simplified, the number of full-scale experiments is drastically reduced, which, in turn, has led to a significant reduction in time and complexity of building a computer model of the whole system.

Key words:

Reliability, efficiency, strata, model, graph, ore grinding.

REFERENCES

- Levitin G., Frenkel I., Dong Y. *Multi-state system reliability analysis and optimization for engineers and industrial managers*. London, Springer-Verlag, 2010. 393 p.
- Ushakov I. *Probabilistic reliability models*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2012. 248 p.
- Lisnianski A., Levitin G. *Multi-state system reliability: assessment, optimization and application*. Singapore, World Scientific, 2003. 358 p.
- Kołowrocki K., Soszyńska-Budny J. *Reliability and safety of complex technical systems and processes. Modeling – Identification – Prediction – Optimization*. London, Springer Series in Reliability Engineering, 2011. 405 p.
- Mingyang Li, Jian Liu, Jing Li, Byoung Uk Kim. Bayesian modeling of multi-state hierarchical systems with multi-level information aggregation. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, vol. 124, pp. 158–164.
- Yu H., Yang J., Mo H. Reliability analysis of repairable multi-state system with common bus performance sharing. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 132, pp. 90–96.
- Yong L., Anxin L., Xiaonan Z. Complex multi-state system reliability modeling and assessment. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2012, vol. 4, no. 9, pp. 4260–4267.
- Peng R., Mo H., Xie M., Levitin G. Optimal structure of multi-state systems with multi-fault coverage. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, vol. 119, pp. 18–25.
- Yeh W.-C., Bae C., Huang C.-L. A new cut-based algorithm for the multi-state flow network reliability problem. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 136, pp. 1–7.
- Eryilmaz S. Dynamic assessment of multi-state systems using phase-type modeling. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 140, pp. 71–77.
- Lisnianski A., Elmakias D., Laredo D., Ben-Haim H. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, vol. 98, pp. 1–6.
- Shubin S., Levitin G., Hongyan D., Shudong S. Component state-based integrated importance measure for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, vol. 116, pp. 75–83.
- Levitin G., Yeh W.-C., Dai Y. Minimizing bypass transportation expenses in linear multistate consecutively-connected systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, vol. 63 (1), pp. 230–238.
- Praks P., Kopustinskas V., Masera M. Probabilistic modeling of security of supply in gas networks and evaluation of new infrastructure. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 144, pp. 254–264.
- Li Y.F., Peng R. Availability modeling and optimization of dynamic multi-state series – parallel systems with random reconfiguration. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, vol. 127, pp. 47–57.
- Abou C. Performance assessment of multi-state systems with critical failure modes: application to the flotation metallic arsenic circuit. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, vol. 95, iss. 6, pp. 614–622.
- Ahmadi-Javid A., Malhame R.P. Optimal control of a multistate failure-prone manufacturing system under a conditional value-at-risk cost criterion. *J. Optimization Theory and Applications*, 2015, no. 167 (2), pp. 716–732.
- Malinowski J. A Monte Carlo method for estimating reliability parameters of a complex repairable technical system with inter-component dependencies. *IEEE Transactions on Reliability*, 2013, vol. 62, iss. 1, pp. 256–266.
- Ushakov I. O vazhnosti adekvatnykh matematicheskikh modeley pri inzhenernom analize nadezhnosti [About importance of adequate mathematical models in engineering reliability analysis] *J. Reliability*, 2011, no. 3 (38), pp. 3–15.
- Ushakov I. *Optimal redundancy allocation. With practical statistical applications and theory*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2013. 256 p.

21. Law M.A., Kelton W.D. *Simulation modeling and analysis*. 4th edition. Boston, McGraw-Hill, 2007. 768 p.
22. Byoung Kyu Choi, Dong Hun Kang. *Modeling and simulation of discrete event systems*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2013. 432 p.
23. Kaizer J.S., Heller A.K., Oberkampf W.L. Scientific computer simulation review. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 138, pp. 210–218.
24. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of hierarchic multilevel systems]. Moscow, Mir Publ., 1973. 344 p.
25. Balasanyan S.Sh. Stratifitsirovannaya model dlya otsenki i analiza effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem so mnogimi sostoyaniyami [A stratified model for the evaluation and analysis of the functioning effectiveness of multistate complex technological systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30.
26. Mesarovich M., Takakhara I. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy* [General systems theory: mathematical foundations]. Moscow, Mir Publ., 1978. 311 p.
27. Balasanyan S.Sh. Kompyuternaya model sopryazheniya elementov v strogo ierarhicheskoy sisteme [A computer model of conjugation of elements in a strictly hierarchical stratified system]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 5, pp. 14–19.
28. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan E.M. Kompyuternaya model dlya stokhasticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessom flotatsii rudy s uchetom nadezhnosti izmelchitel'nogo oborudovaniya [Computer model for stochastic control of the ore flotation process considering grinding equipment reliability]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57.

Received: 11 November 2015.

УДК 55.504.624.131

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Шитов Александр Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, руководитель
научно-исследовательской лаборатории картографирования природных
условий и ресурсов Горно-Алтайского государственного университета,
649000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1.
E-mail: sav103@yandex.ru

Кац Валентина Елизаровна,

руководитель Территориального центра «Алтайгеомониторинг»
ОАО «Геологическое предприятие «Алтай-Гео»», 649100, Республика
Алтай, с. Майма, ул. Заводская, 52. E-mail: altaigeo@mail.gorny.ru

Дутова Екатерина Матвеевна,

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры
гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: dutova@sibmail.com

Молоков Виктор Юрьевич,

старший лаборант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии
и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: vik3011347@yandex.ru

Покровский Виталий Дмитриевич,

ассистент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии
и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов прогноза землетрясений в сейсмоактивных районах Республики Алтай. Подземные воды являются индикатором сейсмических процессов, они реагируют на изменения напряженно-деформированного состояния горных пород в зонах очагов предстоящих тектонических землетрясений.

Цель работы: изучить и оценить влияние землетрясений и афтершокового процесса на характеристики подземных вод Республики Алтай в связи с поисками гидрогеологических предвестников землетрясений.

Методы исследований. В основу работы положены результаты мониторинга подземных вод на территории Республики Алтай, который осуществляется на локальном, территориальном и региональном уровнях. В работе использованы наблюдения Территориального Центра «Алтайгеомониторинг» за гидродинамическим (уровень, дебит), температурным режимами и качественным составом подземных вод. Пунктами наблюдений являются скважины и родники, а в отдаленных районах, ввиду отсутствия таковых, – колодцы.

Результаты. В результате мониторинговых исследований, производимых на территории Республики Алтай, зафиксировано изменение химического состава подземных вод, связанное с влиянием сейсмических событий. Рассмотрены изменения микроэлементного и макрокомпонентного состава подземных вод, произошедшие в результате Чуйского землетрясения и его афтершокового процесса. Проанализированы пространственные и временные характеристики подземных вод региона, особое внимание уделено анализу изменения химического состава и температуры точки мониторинга, расположенной в г. Горно-Алтайске по ул. Северной. Здесь после землетрясения в 2003 г. увеличилась температура воды, а химический состав начал существенно реагировать на землетрясения на территории Республики Алтай. Выявлено, что подготовка землетрясения, сопровождающаяся сложным комплексом изменений полей напряжения в земной коре, оказывает влияние на химический состав, режим и температуру подземных вод региона.

Ключевые слова:

Подземные воды, землетрясения, мониторинг подземных вод, гидрогеохимические характеристики, изменение уровня и дебита родников.

Введение

Алтае-Саянская складчатая область в целом характеризуется повышенной сейсмичностью, и с начала 2000-х гг. в регионе четко фиксируется активизация сейсмической деятельности. В 2003 г. в Республике Алтай произошло Алтайское (Чуйское) землетрясение с магнитудой 7,2, внесённое в список крупнейших мировых геологических событий 2003 г., а в 2011 г. в Республике Тыва – крупное Тувинское землетрясение с магнитудой 6,5 [1, 2]. Происходили и более мелкие землетрясения, их афтершоковый процесс, по мнению сейсмологов, продолжается и может длиться годы и десятилетия [2, 3].

Химический состав подземных вод, как известно, определяется ландшафтно-климатическими условиями, характером рельефа, типом водовмещающих пород и металлогеническими особенностями региона. Роль этих факторов для горно-складчатых сооружений в целом и структур Горного Алтая в частности достаточно внимательно изучена [1–3]. Не менее существенным фактором изменения химического состава подземных вод являются сейсмические события [4–15]. Эти процессы оказывают влияние на флюидный состав посредством изменений напряженно-деформированного состояния среды, что определяет состояние порово-трещинного пространства [5, 6]. При сейсмических событиях образуется большое количество новых трещин в породах, что создает пути для интенсивной миграции флюидов. Известно, что подземные воды на глубинах первых километров находятся под сверхгидростатическим или даже литостатическим давлением, подготовка особенно крупных землетрясений, само событие и афтершоковый процесс оказывают на характеристики подземных вод существенное влияние [7]. При этом по разломной сети региона осуществляется транспортировка флюидов к поверхности, таким образом изменяется химический состав более близкоповерхностных подземных вод.

Цель данного исследования – показать влияние землетрясений и афтершокового процесса на характеристики подземных вод Республики Алтай.

Характеристика объекта и методика исследований

Республика Алтай в гидрогеологическом плане находится в пределах Алтае-Саянской сложной гидрогеологической области. Подземные воды приурочены к водоносным зонам и комплексам с трещинным, трещинно-жильным, трещинно-карстовым и карстовым типами коллектора в осадочных терригенных и карбонатных, осадочно-вулканогенных, вулканогенных, метаморфических и интрузивных породах, имеющих широкий, от мезозойского до протерозойского, возрастной диапазон. В межгорных артезианских бассейнах (Чуйский, Уймонский и др.) подземные воды сосредоточены в четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложениях.

Мониторинг подземных вод на территории Республики Алтай осуществляется Территориальным центром «Алтайгеомониторинг», являющимся структурным подразделением ОАО «Алтай-Гео». Мониторинг ведется на объектном (локальном), территориальном и региональном уровнях. В результате наблюдений фиксируются гидродинамический (уровень, дебит), температурный режимы и качественный состав подземных вод. Замеры уровня воды в скважинах осуществлялись уровнемером KL 010 (Германия) либо УСК ТЭ 100 с точностью 1 см, температура замерялась электронным термометром (Щуп) с точностью измерения 0,5 °С.

Определение объемной активности радона в воде выполнялось в радиологической лаборатории ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по Республике Алтай» прибором Гамма-01С № 55. Общий химический анализ и определение микроэлементов проводились в аналитической лаборатории СО РАН (Новосибирск).

Результаты исследований

В периоды подготовки (форшоковый период), реализации основного события и афтершокового процесса Чуйского землетрясения гидродинамический режим и качественный состав подземных вод непрерывно изменялись [16, 17].

Химический состав подземных вод характеризуется сложными пространственно-временными изменениями минерализации, кислотно-щелочных условий, концентраций основных макро- и микрокомпонентов (фтор, ртуть, марганец, алюминий, литий и другие). Наиболее закономерные и сильные изменения концентраций среди 15 определяемых микрокомпонентов наблюдаются у ртути, которая в связи с этим может рассматриваться как гидрогеохимический индикатор региона. Хорошо выраженные, достигающие аномальных значений концентрации ртути зафиксированы в форшоковый период, сам же период разгрузки сейсмических напряжений характеризуется резким падением ее концентраций (рис. 1). Для последующего афтершокового периода характерно существенное поднятие концентраций, сопровождающее сейсмические события, и постепенное длительное их (концентраций) снижение.

Сейсмические события находят отражение и в газовом составе подземных вод. Содержание радона в подземных водах варьирует от 0,3 Бк/л до аномальных значений – 545 Бк/л, и в среднем составляет 22,8 Бк/л. Повышенные значения зафиксированы на фоне сейсмических событий, каждый аномальный пик зафиксирован незадолго до либо после землетрясения в Алтае-Саянском регионе (табл. 1, 2).

В афтершоковый период отмечается закономерное понижение объемной активности радона (табл. 2).

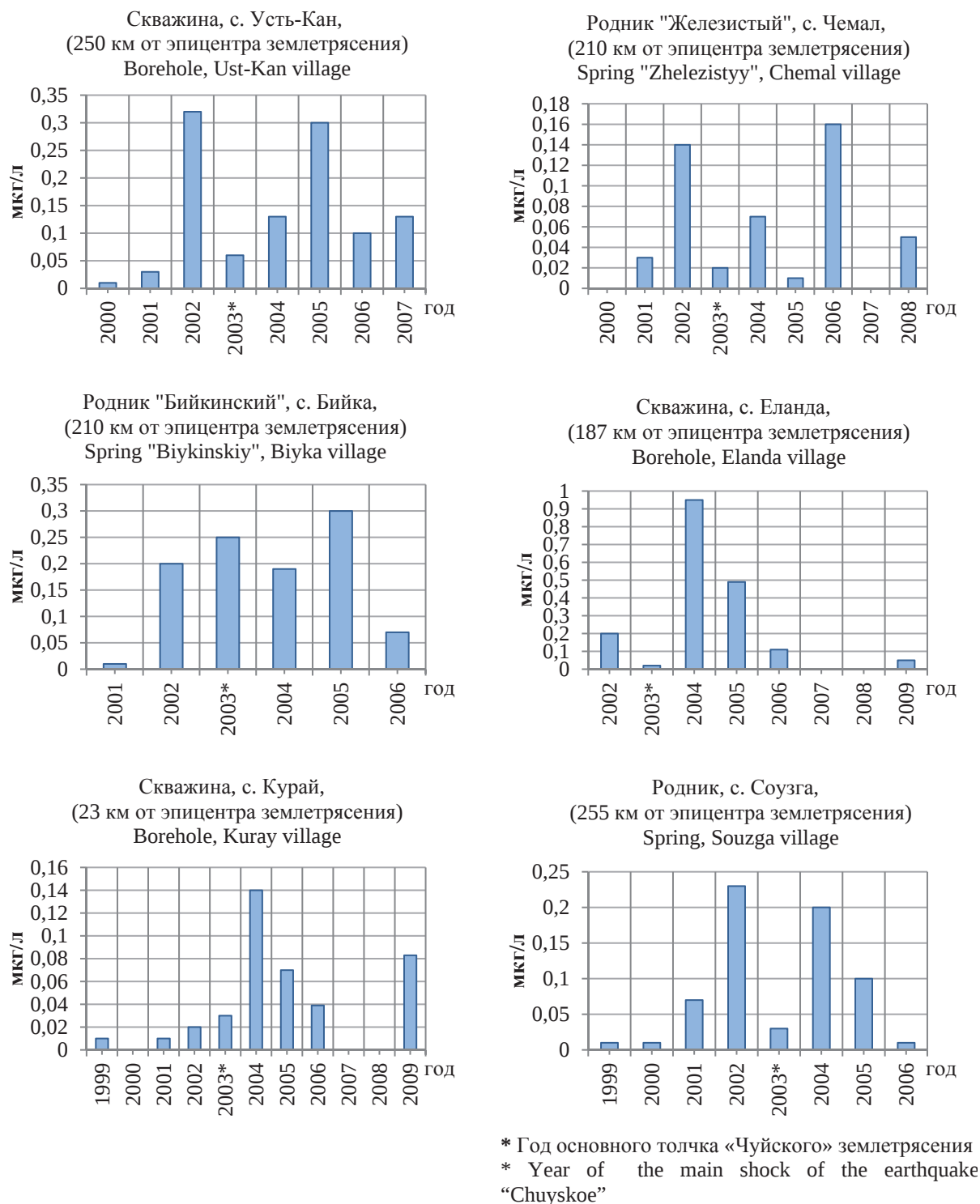


Рис. 1. Изменение содержания ртути в подземных водах

Fig. 1. Changes of mercury content in groundwater

Таблица 1. Аномальные значения содержания радона в подземных водах Республики Алтай**Table 1.** Anomalous values of radon content in groundwater of the Republic of Altai

Район Region	Геологический возраст Geological age	Концентрация радоны, Бк/л Concentration of radon, Bq/l	Дата отбора пробы Date of sample collection	Дата землетрясения Date of earthquake
Усть-Канский Ust-Kansky	Є ₂₋₃ Cr	545	06.04.06	02-06.04.2006
Онгудайский Ongudaysky	D ₁₋₂ ong	104,6	10.07.06	05.07.2006
Майминский Maiminsky	V-Є ₁ es	373,8	20.12.06	15.12.2006
Чемальский Chemalsky	Є ₃ -O ₁ gr	161	26.03.08	29-30.03.08
Турочакский Turochaksky	Q _{III}	101	21.10.08	19.10.2008

Между содержанием радона в водах и средне-месячной энергией сейсмических событий установлена положительная значимая связь (коэффициент корреляции (R^2) 0,26 при 5%-м уровне значимости). Установлена четкая тенденция снижения концентраций радона, на фоне которой прослеживаются их всплески, они связываются нами с сейсмическими событиями на смежных, иногда достаточно удаленных, территориях (рис. 2).

В районе г. Горно-Алтайска 18 и 26 февраля 2004 г. были зафиксированы два подземных толчка с магнитудой 3,4 и 3,1. Эти четко выраженные сейсмические события сопровождались аномальными изменениями в термическом режиме подземных вод: в ряде индивидуальных водоразборных колонок в г. Горно-Алтайске, а также в селах Ая и Каракокша было установлено повышение температуры.

Таблица 2. Сравнительная характеристика содержаний радона в подземных водах Республики Алтай за 2005–2015 гг.**Table 2.** Comparative analysis of radon content in groundwater of the Republic of Altai within 2005–2015

Годы наблюдений Years of monitoring	Количество проб с объемной активностью радоны более ПДУ (60 Бк/л) Number of samples with volumetric activity of radon more than MAND (60 Bq/l)	Содержание радона в Бк/л Concentration of radon in Bq/l		
		Минимальные значения Minimum value	Максимальные значения Maximum value	Среднее Average
2005–2007	75	4	545	22,7
2008–2010	27	4	154	22,3
2011–2012	3	4	136	14,6
2013	–	1	44,6	11,2
2014	–	0,4	51,8	10,6
2015	–	0,3	31,6	9,9

Температура воды в колонке по ул. Северной в г. Горно-Алтайске достигала 39 °С (до 12 °С в настоящее время), в колонке по ул. Осипенко, находящейся в 1,5 км западнее, составляла от 16 до 24 °С, в с. Ая в индивидуальной колонке зафиксирована температура 30 °С. По устным сообщениям жителей, проживающих по ул. Осипенко, отмечено, что потепление вод в индивидуальных колонках происходило неоднократно, как в летний, так и в осенний и зимний периоды, но наиболее часто стало проявляться в годы, последующие сейсмическим событиям. Анализ геолого-геофизических и гидрогеологических материалов по району города и прилегающей территории позволяет предположить, что в его гидрогеологическом облике, вероятно, присутствуют термальные воды, аналогичные Белокурихинским, как нами и было отмечено ранее [17]. В связи с этим с июня 2004 г. на территории Горно-Алтайска, на колонках по ул. Север-

**Рис. 2.** Связь содержаний радона в подземных водах с энергией сейсмических событий в Республике Алтай в 2011–2015 гг.**Fig. 2.** Connection between radon content in groundwater and the energy of the seismic events in the Republic of Altai within 2011–2015

ной, Осипенко и других, были организованы временные наблюдательные пункты за состоянием подземных вод и начаты мониторинговые исследования (наблюдения за уровнями, дебитом, температурой и химическим составом вод). Аналитические исследования проводились в химической лаборатории ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по Республике Алтай».

Наиболее ярко изменения температурного режима вод проявились на колонке по ул. Северной, 16, в г. Горно-Алтайске, каптирующей воды зоны трещиноватости терригенно-карбонатных пород венд-нижнекембрийского возраста, которые на определенных глубинах, как установлено одиночными скважинами при геологических работах, прорываются интрузиями гранитоидов. Исследо-

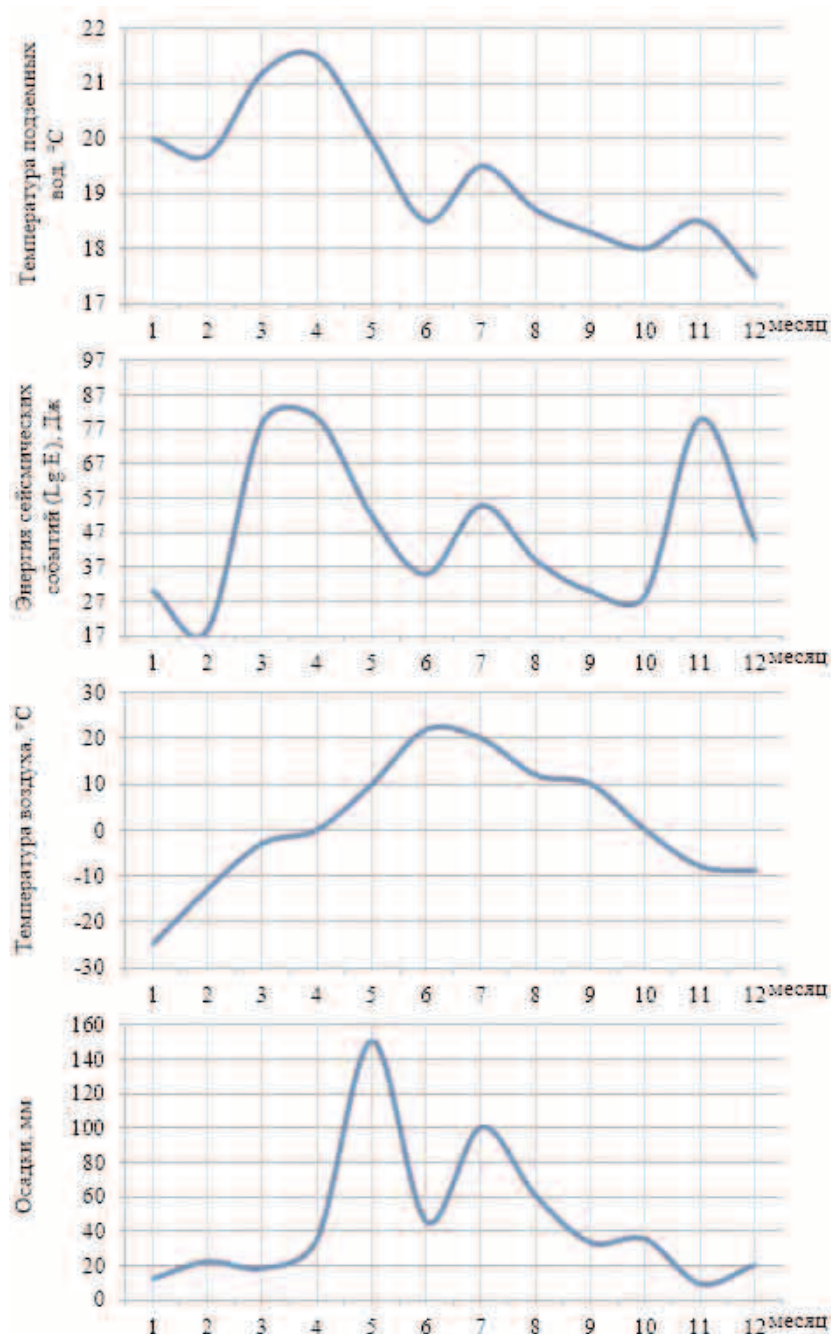


Рис. 3. Сопоставление внутригодовых изменений температуры подземных вод на колонке по ул. Северной с метеорологическими и сейсмическими данными в 2006 г.

Fig. 3. Comparison between groundwater temperature changes within a year in the stand-pipe on Severnaya Street and meteorological and seismic data in 2006

вания воды были начаты в июне 2004 г. в связи с заявлением владелицы колонки о повышении температуры воды до 39 °С, в то время как в предыдущие 48 лет вода в колонке была холодной со средней температурой 5–7 °С (данные РХЭЛ ГАГУ, ТЦ «Алтайгеомониторинг»).

Практически по центру города проходит шовная зона крупного сквозного надвига субмеридиального направления, которая хорошо интерпретируется по геофизическим данным и контролируется многочисленными тектоническими нарушениями, установленными при геологических съемках. Согласно карте новейших разломов, территория расположения колонки относится к зоне развития герцинских глубинных разломов с амплитудой перемещений до 500 м [16, 17]. Это обстоятельство в свете сейсмических событий дает основание предполагать, что появление подземных вод с повышенной температурой может быть связано с раскрытием тектонических трещин и поступлением глубинных термальных вод.

В пользу предположения, что воды, каптируемые колонкой, расположенной на ул. Северной, имеют глубинный характер, свидетельствуют результаты химических анализов, проведенных в Аналитическом центре СО РАН и Томском институте курортологии и физиотерапии. Анализами в составе воды установлено повышенное содержание кремния (до бальнеологических значений), лития, бора, фтора, тяжелых металлов, таких как свинец (до 1 ПДК), цинк (до 0,3 ПДК), кадмий (до 2 ПДК), ртуть (до 0,3 ПДК), мышьяк, никель. Кроме того, проведенными ранее исследованиями в водах колонок по ул. Северной и Осипенко выявлено повышенное содержание урана (до 0,0024 и 0,00048 г/дм³ соответственно). На существенное участие глубинных процессов в формировании теплового режима территории указывает и ряд косвенных признаков. В частности, температура почвы в копушках на усадьбе на глубине 30–40 см составляла 23–25 °С при температуре воздуха 7 °С (25.09.2004 г.), а температура воздуха в подполье дома в феврале достигала 20 °С, несмотря на сильные морозы предшествующего зимнего периода.

Вместе с тем, поскольку подземные воды эксплуатируемого водоносного горизонта относятся к верхней трещиноватой зоне консолидированных пород, имеют безнапорный характер и в принципе слабо защищены от внешнего воздействия, на их формирование, без сомнения, существенное влияние оказывают метеорологические факторы.

Для выявления возможного влияния их характеристик в течение года нами было произведено сравнение температуры в колонке по ул. Северной, сейсмических событий в Республике Алтай и метеорологических характеристик (температуры воздуха, количества осадков) (рис. 3). При этом было выявлено, что температура в колонке имеет некоторую согласованность с сейсмической энергией землетрясений в регионе и почти не связана с метеорологическими характеристиками.

Гидродинамический режим подземных вод на территории г. Горно-Алтайска в рассматриваемый период изучался в скважинах, родниках и колодцах. Изменения уровня поверхности в целом увязываются с сезонными колебаниями. В то же время в отдельные дни на наблюдательных пунктах зафиксирован подъем уровня воды в скважинах, увеличение дебита родников, сопровождающиеся изменениями величины pH и температуры вод в пределах 13–14 °С при фоновой температуре подземных вод региона 7–9 °С. Эти явления, на наш взгляд, свидетельствуют о сейсмических толчках небольшой магнитуды.

Сопоставление температуры подземных вод и количества осадков выявило наличие слабой связи характеристик воды в колонке с сезонными колебаниями метеорологических параметров ($R=0,3$, при уровне достоверности $<0,05$ $R_{кр}=0,23$). В то же время коэффициент корреляции с энергетическим классом землетрясений составляет 0,5, при уровне достоверности $<0,05$ $R_{кр}=0,23$, что может свидетельствовать о значимом влиянии сейсмических событий на качество вод.

Как показали исследования, химический состав воды в колонке за период наблюдений с 2004 по 2010 г. весьма чутко реагирует на все малоамплитудные сейсмические события как в эпицентральной части землетрясения, так и на сопредельных территориях Алтае-Саянского горного региона. Воды колонки можно рассматривать в качестве индикатора сейсмических событий (рис. 4, 5), причем наиболее интенсивное реагирование химического состава подземных вод наступает спустя 1–2 недели после сейсмического события.

Анализ СВАН-диаграмм показал следующие закономерности (рис. 4, 5). В периодизации землетрясений присутствуют двухгодовой, полугодовой, четырехмесячный, сорокадневный ритмы. За период наблюдения эти ритмы наименее сильно проявляются с конца 2005 до середины 2006 г. Химический состав подземных вод за наблюдаемый период меняется существенно. В динамике показателя pH наблюдаются следующие ритмы: двухгодовой, годовой, трехмесячный; в содержании Ca^{2+} : двухгодовой, пятимесячный, трехмесячный; в содержании NO_3^- : двухгодовой, пятимесячный; в содержании SO_4^{2-} : двухгодовой, годовой, четырехмесячный, трехмесячный. В целом необходимо отметить, что периодизация катионно-анионного состава подземных вод, а также изменение этой периодизации совпадает с подобными характеристиками lg E, что может свидетельствовать о влиянии сейсмических событий на химический состав вод изучаемого объекта.

Также необходимо отметить, что состав подземных вод за изучаемый период в связи с землетрясениями на Алтае и Саянах изменяется по-разному. Так, показатель pH наиболее сильно прореагировал на землетрясения на Алтае в период с 2004 по 2006 г., а анионно-катионный состав изучаемых подземных вод – на землетрясения в Саянах.

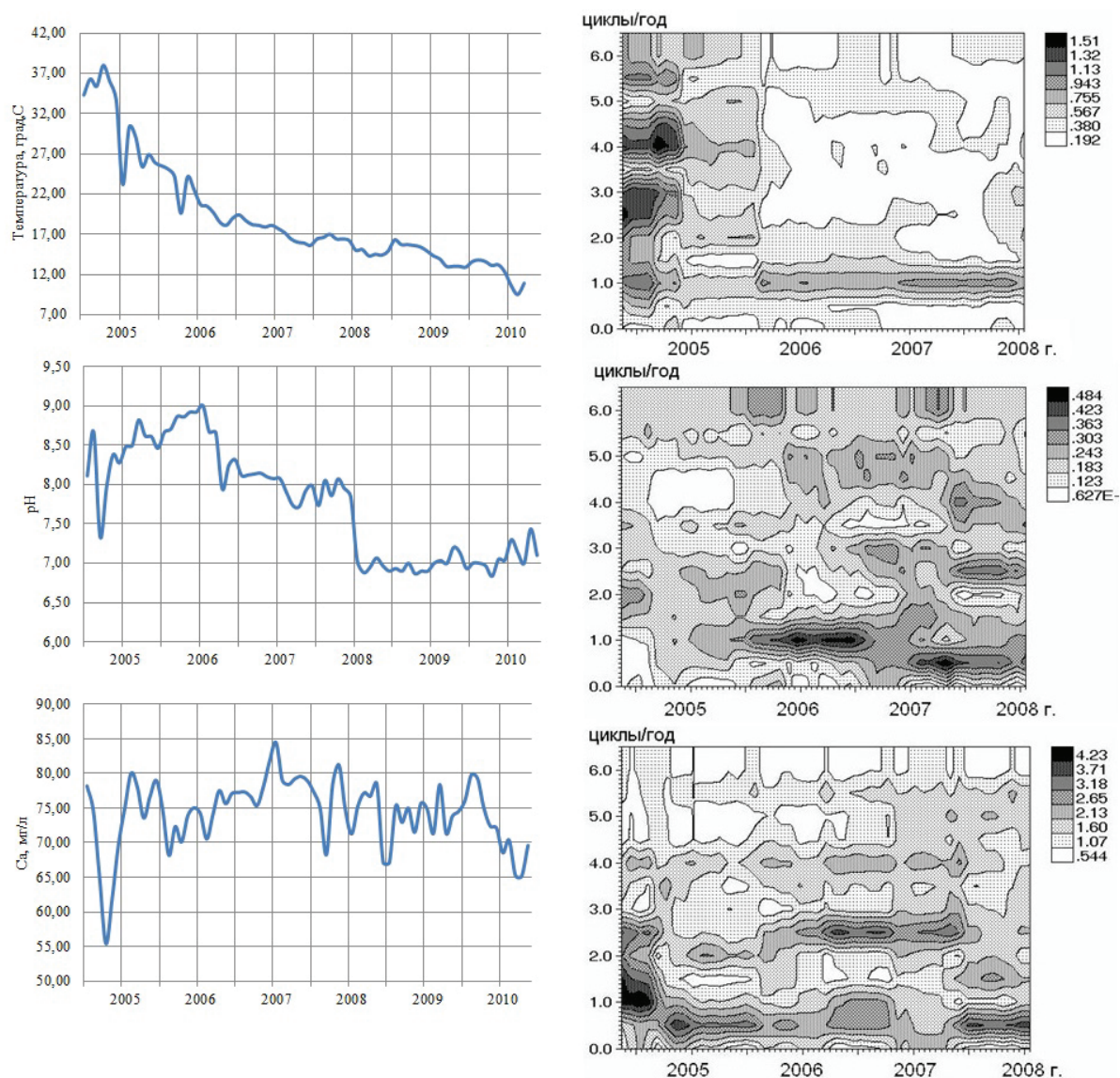


Рис. 4. Изменение температуры и химического состава подземных вод в связи с землетрясениями (на примере колонки по ул. Северной, 16) в сопоставлении с периодограммами спектральной плотности

Fig. 4. Changes of groundwater temperature and chemical composition due to the earthquakes (using the stand-pipe on Severnaya Street, 16 as an example) versus periodograms of spectral intensity

В результате тектонических подвижек во время сейсмических толчков напор термальных вод по отдельным трещинам увеличивался, поднялся их уровень. Это привело к смещению термальных вод зоны трещиноватости палеозойских пород с водами четвертичных отложений и некоторому повышению температуры последних.

На рис. 4, 5 отражены вариации показателей качества вод за период 2004–2010 гг. Как видно, химический состав вод в колонке по ул. Северной характеризуется нестабильностью содержания анализируемых показателей. Графики концентраций катионов и анионов в водах колонки за прошедший период пилообразные. Особенно это характерно для азотистых соединений, которые вы-

деляются многочисленными короткоживущими аномальными всплесками и зачастую не коррелируются с другими показателями.

Одна из причин такой динамики азотистых соединений может быть связана с химическими реакциями, происходящими вследствие сейсмических процессов. При этом в условиях повышенной температуры может происходить быстрое образование и распад различных азотистых соединений.

Кроме этого, выявлено наличие средней степени связи между сезонным количеством осадков и количеством нитратов в подземных водах (коэффициент корреляции 0,51 при $p=0,001$, $r_{кр}=-0,18$) изучаемой колонки по ул. Северной, что может быть связано с сезонными условиями попадания нитратов в подземные воды.

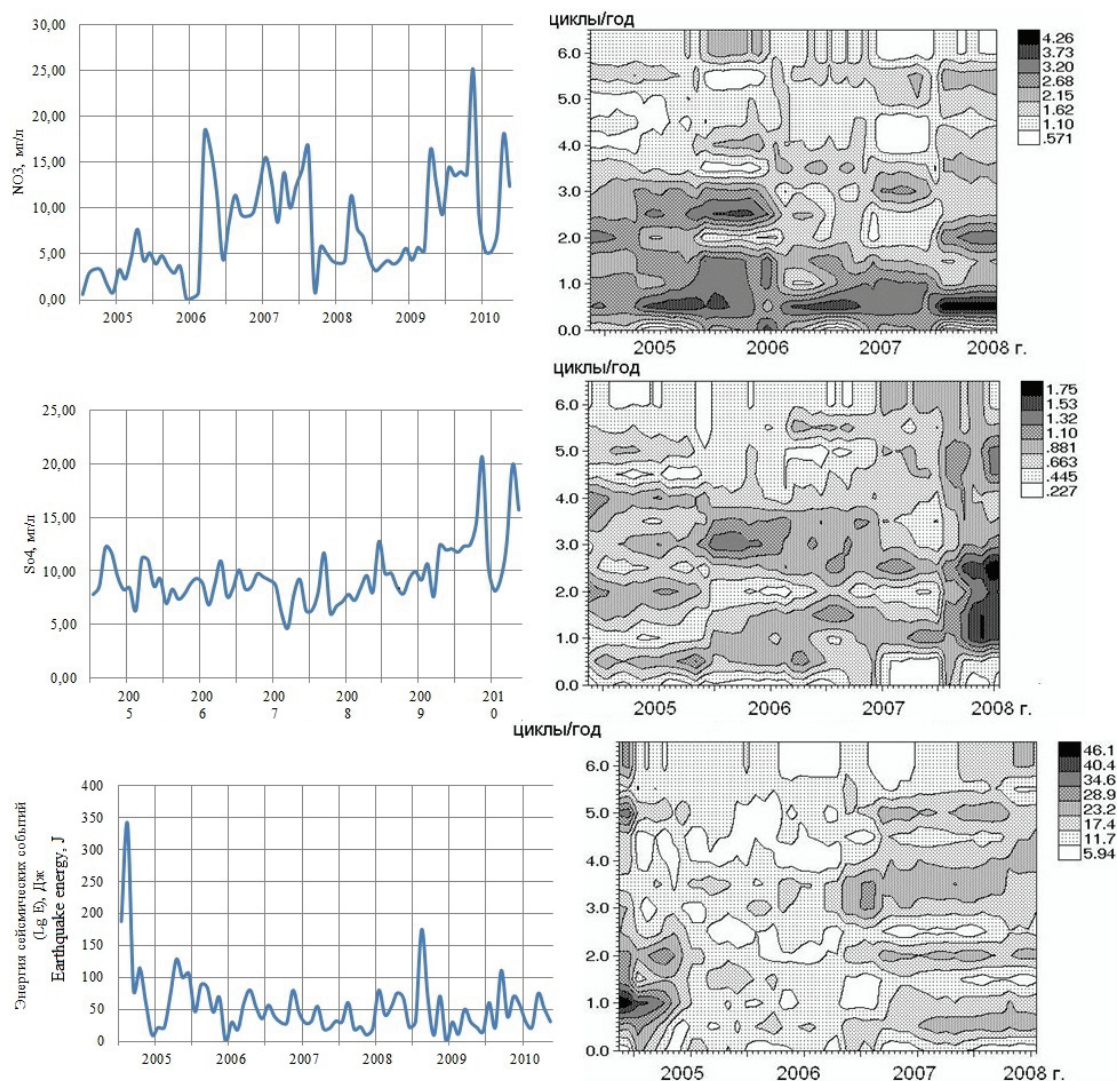


Рис. 5. Изменение химического состава подземных вод в связи с землетрясениями (на примере колонки по ул. Северной, 16)

Fig. 5. Changes of chemical groundwater composition due to the earthquakes (using the stand-pipe on Severnaya Street, 16 as an example)

Основные выводы

Таким образом, в результате изучения влияния сейсмических процессов на гидрогеологические характеристики были получены следующие результаты:

1. Вследствие Чуйского землетрясения и афтершоковых сейсмических событий, продолжающихся на Алтае до настоящего времени, прослеживается влияние их на гидродинамический режим и качественный состав подземных вод (микроэлементные и макрокомпонентные показатели). Колебания показателей режима и качества вод носят как региональный, так и локальный характер, что увязывается с малоамплитудными сейсмическими событиями (их магнитудой, глубиной эпицентра, гидрогеологической ситуацией). Аномальные значения индикаторных (косейсмических) показателей химического состава подземных вод (азотистые соединения, фтор, кремний, радон) прослежи-

ваются 1–2 недели, после чего фоновый состав вод восстанавливается.

2. Одним из дополнительных режимобразующих факторов состояния подземных вод в Горном Алтае в последние годы и до настоящего времени являются сейсмические события в Алтае-Саянском регионе.
3. В результате продолжающихся сейсмических событий изменяется гидродинамический режим подземных вод и их качественный состав. Данные характеристики могут быть использованы для прогнозных оценок сейсмической активности Алтая.

Подготовка землетрясения, сопровождающаяся сложным комплексом изменений полей напряжения в земной коре, оказывает влияние на химический и газовый состав, а также на режим и температуру подземных вод региона.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 13-05-98072 р-Сибирь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуйское землетрясение и его афтершоки / С.В. Гольдин, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.Г. Филина, Ю.И. Колесников, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова, М.А. Ярыгина // Доклады Академии наук (Геофизика). – 2004. – Т. 395. – № 4. – С. 61–67.
2. Чуйское землетрясение и его афтершоковый процесс в структуре сейсмичности Алтае-Саянской горной области / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.Г. Филина, Е.В. Лескова // Труды VI Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. – Сочи, 2005. – С. 49–64.
3. Чуйское землетрясение и динамика сейсмической активизации эпицентральной области / А.Ф. Еманов, С.В. Селезнев, С.В. Гольдин, А.А. Еманов, А.Г. Филина, Ю.И. Колесников, А.В. Фатеев, Е.В. Лескова, М.А. Ярыгина // Труды научно-практической конференции. – Горно-Алтайск, 2004. – С. 3–14.
4. Вартанян Г.С., Бредехофт Дж.Д., Роуэллофф С. Гидрогеологические методы исследования тектонических напряжений // Советская геология. – 1991. – № 9. – С. 3–12.
5. Гидрогеодинамические предвестники землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1984. – 212 с.
6. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизический и тектонический аспекты. – М.: Наука, 2009. – 329 с.
7. Киссин И.Г. Землетрясение и подземные воды. – М.: Наука, 1982. – 174 с.
8. Thomas D. Geochemical precursor to seismic activity // Pure Appl. Geophys. – 1988. – V. 126. – № 2–4. – P. 241–266.
9. Wakita H., Nakamura Y., Sano Y. Short-term and intermediate-term geochemical precursors // Pure Appl. Geophys. – 1988. – V. 126. – № 2–4. – P. 267–278.
10. Киссин И.Г. Новые данные о «чувствительных зонах» земной коры и формирование предвестников землетрясений и постсейсмических эффектов // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 548–565.
11. Вартанян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеодеформационное поле Земли // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 262. – № 2. – С. 310–314.
12. Geochemical variations during the 2012 Emilia seismic sequence / A. Sciarra, B. Cantucci, G. Galli, D. Cinti, L. Pizzino // Geophysical Research Abstracts. – 2015. – V. 17. – P. 945–950.
13. Subduction and slab tearing dynamics constrained by thermal anomalies in the Anatolia-Aegean region / V. Roche, L. Guillou-Frottier, L. Jolivet, Ch. Loiselet, V. Bouchot // Geophysical Research Abstracts. – 2015. – V. 17. – P. 654–660.
14. Kopylova G.N., Boldina S.V. The response of water level in the YuZ-5 well, Kamchatka to the magnitude 9.3, Sumatra-Andaman earthquake of December 26, 2004 // Journal of Volcanology and Seismology. – 2007. – V. 1. – № 5. – P. 319–327.
15. Kopylova G.N., Taranova L.N. Synchronization signals in the variations of groundwater chemical composition in Kamchatka in relation to the strong ($\mu w \geq 6.6$) earthquakes // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2013. – V. 49. – № 4. – P. 577–586.
16. Шитов А.В., Кац В.Е., Харьковина М.А. Эколого-геодинамическая оценка Чуйского землетрясения // Вестник Моск. ун-та. Серия «Геология». – 2008. – № 3. – С. 41–47.
17. Кац В.Е., Шитов А.В., Драчев С.С. О механизмах изменения химического состава и температуры подземных вод в районе Горно-Алтайска // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2010. – № 3. – С. 207–212.
18. Дутова Е.М. Высотная гидрогеохимическая зональность Алтае-Саянской складчатой области // Труды Всероссийской конференции «Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири». – Томск, 2003. – С. 65–69.
19. Дутова Е.М. Особенности формирования гидрогеохимического фона рассеянных элементов в условиях гумидного климата // Материалы регион. конф. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 369–372.
20. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова // Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза. – Новосибирск, 2007. – Т. 2. – 389 с.

Поступила 19.10.2015 г.

UDC 55.504.624.131

CHANGES OF CHEMICAL GROUNDWATER COMPOSITION IN THE REPUBLIC OF ALTAI DUE TO THE EARTHQUAKES

Alexander V. Shitov,

Gorno-Altai State University, 1, Lenkin Street, Gorno-Altai, 649000, Russia. E-mail: sav103@yandex.ru

Valentina E. Kats,

OJSC «Geological Enterprise «Altay-Geo», 52, Zavodskaya Street, Maima, 649100, Russia. E-mail: altaigeo@mail.gornyy.ru

Ekaterina M. Dutova,

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

Viktor Yu. Molokov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vik3011347@yandex.ru

Vitaly D. Pokrovskiy,

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

The relevance of the study is caused by the need to improve the methods of forecasting the earthquakes in seismically active regions of the Republic of Altai. Groundwater is an indicator of seismic processes and responds to the changes of the stress-strain state of earth material within the zones of forthcoming tectonic earthquakes sources.

The main aim of the study is to examine and assess the impact of the earthquakes and aftershocks on the peculiarities of the groundwater of the Republic of Altai in order to find the hydrogeological premonitory symptoms of the earthquakes.

The methods used in the study: the study is based on the results of the groundwater monitoring within the Republic of Altai, which is carried out at local, territorial and regional levels. Hydrodynamic (level, discharge), temperature conditions and qualitative composition of groundwater are observed by the Territorial Center «Altaigeomonitoring». The observation points relate to interstices and springs and in the absence thereof within remote areas – to wells.

The results. As a result of the monitoring studies carried out within the Republic of Altai the changes of the chemical groundwater composition caused by the impact of seismic events were revealed. The changes of microelement and macrocomponent groundwater composition due to the Chuya earthquake and its aftershocks were studied. The spatial and temporal characteristics of groundwater in the region are analyzed. Special attention is given to the analysis of the changes of the chemical composition and temperature within observation point located on the Severnaya Street in Gorno-Altai. After the earthquake in 2003 the water temperature here increased and the chemical composition started to respond markedly to the earthquakes within the Republic of Altai. Thus, the preparation of an earthquake accompanied by a complex set of changes of stress fields in the Earth's crust influences the chemical composition, conditions and temperature of the groundwater within the region.

Key words:

Groundwater, earthquakes, groundwater monitoring, hydrogeochemical composition, changes of level regime and discharge of springs.

The research was supported by RFBR grant No. 13–05–98072 r-Siberia.

REFERENCES

1. Goldin S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Kolesnikov Yu.I., Fateev A.V., Leskova E.V., Yarygina M.A. Chuyskoe zemletryasenie i ego aftershoki [Chuy earthquake and its aftershocks]. *Doklady akademii nauk (Geofizika)*, 2004, vol. 395, no. 4, pp. 61–67.
2. Emanov A.F., Emanov A.A., Filina A.G., Leskova E.V. Chuyskoe zemletryasenie i ego aftershokovyy protsess v strukture seysmichnosti Altae-Sayanskoy gornoy oblasti [Chuya earthquake and its aftershock process within the structure of seismicity of the Altai-Sayan mountains]. *Trudy VI Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po seysmostoykomu stroitelstvu i seysmicheskomu rayonirovaniyu* [Proc. 6th Rus. Nat. Conf. on Earthquake Engin. and Seismic Zonation]. Sochi, 2005. pp. 49–64.
3. Emanov A.F., Seleznev S.V., Goldin S.V., Emanov A.A., Filina A.G., Kolesnikov Yu.I., Fateev A.V., Leskova E.V., Yarygina M.A. Chuyskoe zemletryasenie i dinamika seysmicheskoy aktivizatsii epitsentralnoy oblasti [Chuya earthquake and dynamic of seismic activation of the epicentral area]. *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. Scien.-Prac. Conf.]. Gorno-Altai, 2004. pp. 3–14.
4. Vartanyan G.S., Bredekhoft J.D., Rouellofs S. Hidrogeologicheskie metody issledovaniya tektonicheskikh napryazheniy [Hydrogeological methods of tectonic stress research]. *Soviet Geology*, 1991, no. 9, pp. 3–12.
5. *Gidrogeodinamicheskie predvestniki zemletryaseniya* [Hydrogeodynamic earthquake precursors]. Moscow, IPE RAS USSR Press, 1984. 212 p.

6. Kissin I.G. *Flyuidy v zemnoy kore. Geofizicheskiy i tektonicheskiy aspekty* [Well fluid in the crust. Geophysical and tectonic aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2009. 329 p.
7. Kissin I.G. *Zemletryasenie i podzemnye vody* [Earthquake and groundwater]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 174 p.
8. Thomas D. Geochemical precursor to seismic activity. *Pure Appl. Geophys.*, 1988, vol. 126, no. 2–4, pp. 241–266.
9. Wakita H., Nakamura Y., Sano Y. Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *Pure Appl. Geophys.*, 1988, vol. 126, no. 2–4, pp. 267–278.
10. Kissin I.G. Novye dannye o «chuvstvitelnykh zonakh» zemnoy kory i formirovaniye predvestnikov zemletryaseniya i postseismicheskikh effektov [Recent data on «sensitive area» of the Earth's crust and formation of earthquake precursors and post-seismic effects]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 548–565.
11. Vartanyan G.S., Kulikov G.V. Hidrogeodeformatsionnoye pole Zemli [Hydrogeodeformational Earth's field]. *Proceedings of AS USSR*, 1982, vol. 262, no. 2, pp. 310–314.
12. Sciarra A., Cantucci B., Galli G., Cinti D., Pizzino L. Geochemical variations during the 2012 Emilia seismic sequence. *Geophysical Research Abstracts*, 2005, vol. 17, pp. 945–950.
13. Roche V., Guillou-Frottier L., Jolivet L., Loiselet Ch., Bouchot V. Subduction and slab tearing dynamics constrained by thermal anomalies in the Anatolia-Aegean region. *Geophysical Research Abstracts*, 2015, vol. 17, pp. 654–660.
14. Kopylova G.N., Boldina S.V. The response of water level in the yuz-5 well, Kamchatka to the magnitude 9.3, sumatra-andaman earthquake of December 26, 2004. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 319–327.
15. Kopylova G.N., Taranova L.N. Synchronization signals in the variations of groundwater chemical composition in Kamchatka in relation to the strong ($\mu w \geq 6.6$) earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 577–586.
16. Shitov A.V., Kats V.E., Kharkina M.A. Ekologo-geodinamicheskaya otsenka Chuyskogo zemletryaseniya [Ecological and geodynamic assessment of Chuya earthquake]. *Bulletin of Moscow University. Geology series*, 2008, no. 3, pp. 41–47.
17. Kats V.E., Shitov A.V., Drachev S.S. O mekhanizмах izmeneniya khimicheskogo sostava i temperatury podzemnykh vod v rayone Gorno-Altayska [On ways of changes of groundwater chemical composition and temperature within Gorno-Altai]. *Geocology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2010, no. 3, pp. 207–212.
18. Dutova E.M. Vysotnaya gidrogeokhimicheskaya zonalnost Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti [Altitude hydrogeochemical zonation of Altai-Sayan fold area]. *Trudy Vserossiyskoy konferentsii «Problemy poiskovoy i ekologicheskoy geokhimii Sibiri»* [Proc. Rus. Hydrogeochemical Conf. Problems of exploratory and ecological geochemistry of Siberia]. Tomsk, 2003. pp. 65–69.
19. Dutova E.M. Osobennosti formirovaniya gidrogeokhimicheskogo fona rasseyannykh elementov v usloviyakh gumidnogo klimata [Peculiarities of hydrogeochemical ground formation of trace elements under the conditions of humid climate]. *Materialy regionalnoy konferentsii* [Proc. of the regional conference]. Tomsk, 2000, vol. 1. pp. 369–372.
20. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratova I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda*. Novosibirsk, 2007. 389 p.

Received: 19 October 2015.

УДК 004.032.24, 004.032.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Скороходов Алексей Викторович,

кандидат технических наук, научный сотрудник группы атмосферной акустики Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: vazime@yandex.ru

Аксёнов Сергей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30; доцент кафедры автоматизации обработки информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 40; инженер научно-образовательного центра компьютерных наук и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: axyonov@tpu.ru

Аксёнов Андрей Владимирович,

аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: image@tpu.ru

Лайком Дмитрий Николаевич,

аспирант кафедры оптимизации систем управления Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: wedun@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки алгоритмов и программных средств для классификации типов облачности по спутниковым снимкам однослойной облачности, полученных с помощью спектрорадиометра MODIS, используемого аппаратами дистанционного зондирования Земли Terra и Aqua, и высокопроизводительных систем.

Цель работы: эффективный и быстрый анализ спутниковых снимков размерами 5416×8120 пикселей однослойной облачности, полученных с помощью спектрорадиометра MODIS с помощью вероятностной нейронной сети, для классификации облачности по 27 типам.

Методы исследования. Для достижения цели применяются методы распараллеливания вычислений, нейросетевые вычисления, методы компьютерного зрения и анализа текстур, алгоритмы классификации, технологии высокопроизводительных вычислений для многоядерных систем с общей памятью (OpenMP), графических процессоров (CUDA) и распределенных систем (MPI).

Результаты. Процедура классификации, основанная на вероятностной нейросетевой модели, сравнивает фрагменты снимка с эталонами, полученными ранее и классифицированными экспертами. Для корректного анализа фрагмента изображения его требуется сравнить с тысячами эталонов, что приводит к существенным временным затратам. Характер вычислений позволяет разбить входной снимок на несколько более мелких и обработать их независимо на разных вычислительных устройствах или устройствах, поддерживающих одновременное выполнение разных задач. В работе сравнивается производительность трех подходов к распараллеливанию вычислений: на основе многопоточных вычислений, выполняемых многоядерными центральными процессорами, многопоточных вычислений внутри мультипроцессоров графических ускорителей и распределенной обработки на базе кластера. Для последнего случая, в котором вычислительные задачи разделяются уже не между потоками, а процессами с индивидуальными адресными пространствами, было предложено два подхода к решению проблемы: на основе разделения задач и разделения данных. Для каждого варианта параллельной обработки приведены детальное описание и оценка его производительности при анализе полноразмерного снимка MODIS. Показано, что использование распределенной обработки и/или графических ускорителей при решении задачи классификации однослойной облачности, основанной на вероятностной нейронной сети, имеет существенное преимущество по производительности не только по сравнению с классическим алгоритмом, но и его модификацией для многоядерных центральных процессоров.

Ключевые слова:

Классификация облачности, параллельные вычисления, обработка спутниковых данных, MODIS, суперкомпьютер, графический процессор, нейронная сеть.

Введение

В настоящее время результаты дистанционного зондирования Земли из космоса занимают важное место в различных тематических исследованиях, системах мониторинга окружающей среды, прогноза погоды, обеспечения безопасности полетов воздушных судов и в других сферах человеческой деятельности. Данные, поступающие с бортов космических аппаратов, нуждаются в первичной и тематической обработке для их дальнейшего использования в прикладных целях. Начиная с запуска первых спутниковых систем и до настоящего времени постоянно разрабатываются и совершенствуются не только сами сенсоры, но и алгоритмы обработки данных, получаемых с их помощью. В условиях постоянно увеличивающихся объемов спутниковой информации обязательным требованием к алгоритмам ее обработки и их программным реализациям является не только автоматизация, но и высокая производительность [1].

На данный момент существует множество алгоритмов тематической обработки спутниковых данных, предназначенных для интерпретации спектральной информации различных объектов, классификации и распознавания образов, оперативного мониторинга окружающей среды, геологоразведки и многого другого. Однако большинство этих алгоритмов непригодно для оперативной обработки спутниковых данных, несмотря на их эффективность при решении каких-либо тематических задач, процесс решения которых не был ограничен по времени. К наиболее ярким примерам таких алгоритмов относятся методы классификации и распознавания объектов на основе информации о текстуре их изображений на спутниковых снимках [2–4]. В настоящее время существует большое число эффективных алгоритмов классификации и распознавания образов на изображениях, в частности лиц людей, печатных или рукописных символов, номерных знаков автомобилей [5–7]. Однако при обработке полноразмерных спутниковых изображений, которые могут иметь разрешение 8000×5000 пикселей и даже больше, а также при решении задач множественной классификации (один объект имеет несколько десятков разновидностей) эти алгоритмы оказываются неэффективными. Время классификации может занимать несколько десятков часов, что не удовлетворяет требованию высокой производительности.

Начиная с середины 90-х годов для оперативной обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса начинают применяться системы параллельной обработки информации – суперкомпьютеры. Одними из главных пользователей, применяющих суперкомпьютер для оперативной обработки спутниковой информации, являются специалисты из Goddard Space Flight Center и Meteo France [8]. С середины 2000-х годов начинается массовое производство многоядерных процессоров, что открывает пользователям персональных компьютеров возможность использования па-

раллельных вычислений для своих целей [9]. Развитие графических процессоров общего назначения в конце 2000-х годов и технологий их использования для решения вычислительных задач, не связанных непосредственно с обработкой изображений, позволило достичь, а затем и значительно превысить вычислительную производительность многоядерных центральных процессоров [10]. При этом и сами суперкомпьютеры начинают создаваться с использованием обычных и специализированных видеопроцессоров.

Бурное развитие вычислительной техники в последнее десятилетие, однако же, не повлекло за собой создание большого числа новых методов параллельной обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса или адаптацию к новым вычислительным аппаратным средствам уже существующих. Одной из причин является невозможность распараллеливания некоторых алгоритмов в силу своих особенностей [11]. Другая причина – затруднения самих разработчиков, связанные с выбором технологий параллельной обработки данных OpenMP, Nvidia CUDA, MPI и других, а также адаптацией алгоритмов под них. В то же время существует целый ряд алгоритмов, например, основанных на искусственных нейронных сетях, предполагающих параллельную реализацию. Поэтому целью данной работы является модификация разработанного нами ранее алгоритма классификации однослойной облачности и облаков вертикального развития, по данным MODIS, с пространственным разрешением 250 м для его реализации с помощью распределения вычислений на разных аппаратных платформах и определения возможности его использования в системах оперативного мониторинга атмосферы и подстилающей поверхности [12].

Алгоритм

В качестве классификатора для решения задачи автоматической классификации облачности используется вероятностная нейронная сеть [13], структура которой показана на рис. 1. Сети такого типа содержат, как правило, три вычислительных слоя. На вход нейронной сети предъявляются нормализованные значения текстурных признаков классифицируемого фрагмента спутникового снимка облачности $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_8)^T$. Первый вычислительный слой содержит наборы значений всех обучающих образцов для каждой из разновидностей облаков. По сути, каждый нейрон этого слоя соответствует конкретному обучающему образцу определенного типа облачности. При этом объем обучающей выборки составляет 5400 образцов, по 200 фрагментов снимков на каждый класс (тип облачности). Откликами нейронов второго слоя являются рассчитанные значения уровней их активности. Второй слой состоит из нейронов-сумматоров, накапливающих отклики нейронов предыдущего слоя, принадлежащих одному классу. Количество нейронов этого слоя равняется числу

распознаваемых классов – 27. Третий слой содержит один единственный нейрон, определяющий класс с максимальной активностью, которому и соответствует классифицируемый образец.

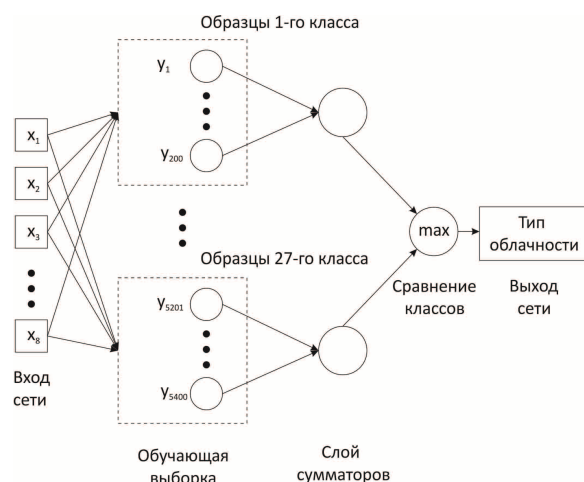


Рис. 1. Архитектура вероятностной нейронной сети для задачи классификации типов облачности

Fig. 1. Probabilistic neural network architecture for cloud type classification

Алгоритм функционирования сетей такого типа состоит из следующих этапов:

1. На вход сети предъявляется набор нормированных значений текстурных признаков классифицируемого фрагмента изображения облачности x .
2. Для каждого нейрона первого слоя рассчитывается уровень его активности:

$$f_i(x) = \exp \frac{y_i x - 1}{\sigma^2},$$

где y_i – набор нормированных значений i -го обучающего образца, $i=1,2,\dots,5400$; σ – параметр сглаживания функции активации.

3. Вычисляются суммарные отклики нейронов каждого класса:

$$F_j = \sum_{i=1}^{m_j} f_i(x),$$

где $m_j=200$ – число обучающих образцов j -го класса, $j=1,2,\dots,27$.

4. Для каждого класса вычисляется его уровень активности, определяемый функцией Парзена [13]:

$$P_j = \frac{F_j}{m_j (2\pi\sigma^2)^{0,5d}},$$

где $d=8$ – число классификационных характеристик.

5. Определяется идентификатор класса с наибольшим значением P_j . Поскольку в нашей задаче m_j одинаковы для всех классов, то расчет значений функции Парзена можно исключить и выявить номер класса с максимальным значением F_j . Таким образом, классифицируемый образец приписывается именно этому классу.

Полностью алгоритм классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS можно представить в виде схемы, показанной на рис. 2. Анализируя эту схему и алгоритм функционирования сети, можно выделить большое число циклов:

- сканирование изображения скользящим окном (внешний цикл);
- расчет текстурных признаков, включая вспомогательные вычисления по формированию матриц смежности [14], векторов различия [15], гистограмм сумм и разностей [16] соседних пикселей исследуемого фрагмента изображения;
- нормировка значений текстурных признаков;
- вычисление f_i ;
- вычисление F_j ;



Рис. 2. Схема алгоритма классификации облачности

Fig. 2. Scheme of cloud classification algorithm

- определение номера класса с наибольшим значением F_j .

Таким образом, можно сделать вывод, что использование методов параллельной обработки информации для решения задачи классификации облаков по спутниковым снимкам является целесообразным из-за большого количества вычислительных циклов, как внешних, так и внутренних.

Реализация алгоритма с использованием OpenMP

Наличие вычислительных систем, имеющих один или несколько многоядерных процессоров, ядра которых зачастую поддерживают одновременную многопоточность, позволяет использовать технологию OpenMP для повышения производительности программных средств [17]. Основная суть этой технологии заключается в распределении главным исполняемым потоком элементов задачи между подчиненными потоками, которые работают параллельно на различных ядрах одного или нескольких процессоров. При этом задача и данные для нее описываются с использованием специальных директив препроцессора, имеющих схожий синтаксис в разных языках программирования.

Примером такой задачи является вычисление каких-либо значений в цикле. Так, общее число итераций цикла может быть поделено поровну между различными потоками, выполняемыми параллельно. Таким образом, после выполнения элементов задачи разными потоками общий результат будет доступен основному потоку. При этом время выполнения всех итераций цикла значительно сокращается. Однако OpenMP имеет ряд серьезных ограничений, особенно в случае с вложенными циклами и наличием большого числа зависимых переменных, результат вычисления которых зависит от множества предыдущих операций [18]. Поэтому OpenMP главным образом применяется для распараллеливания внутренних циклов с малым числом зависимых переменных, или не имеющих их вовсе.

Как уже было сказано ранее, предложенный алгоритм классификации облачности предполагает множество внутренних циклов, которые можно распараллелить с использованием технологии OpenMP (директива `#pragma omp parallel for`), внутри внешнего цикла (сканирование изображения скользящим окном):

- формирование матриц смежности яркости соседних пикселей исследуемого фрагмента изображения;
- получение векторов различия яркости соседних пикселей;
- вычисление гистограмм сумм и разностей яркостей соседних пикселей;
- расчет значений самих текстурных признаков;
- нормировка полученных значений текстурных признаков;
- вычисление f_i ;
- вычисление F_j .

Следует отметить, что принципиально структура алгоритма классификации облачности с исполь-

зованием технологии OpenMP не отличается от приведенной схемы на рис. 2, поскольку параллельные блоки идут последовательно в главном потоке. Производительность алгоритма классификации облачности была апробирована на полноразмерных спутниковых снимках MODIS с пространственным разрешением 250 м, имеющих размеры 8120×5416 пикселей. При этом использовался двухъядерный процессор Intel Core i3 550 с поддержкой Multi-Threading, имеющий тактовую частоту 3200 МГц. Максимальное количество одновременно исполняемых потоков при применении данного процессора – 4. При использовании базового алгоритма время классификации облачности составило более 28 часов. Применение технологии OpenMP позволило сократить время выполнения на 20 % – до 23 часов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что технология OpenMP позволяет немного повысить производительность программных средств на стационарных компьютерах, имеющих многоядерные процессоры. Однако для оперативной классификации облачности по спутниковым снимкам такого прироста в производительности явно недостаточно.

Реализация алгоритма с использованием Nvidia CUDA

Рассмотрим другую технологию параллельных вычислений – Nvidia CUDA, основная суть которой заключается в использовании графических процессоров общего назначения (видеокарт) для выполнения «неграфических» вычислений [9]. Современные видеоадаптеры обладают несколькими мультипроцессорами, каждый из которых состоит из большого числа потоковых процессоров (ядер CUDA), способных выполнять примитивные операции, например преобразовывать координаты трехмерных объектов в различных графических приложениях. Таким образом, потоковые процессоры, число которых достигает нескольких тысяч, могут одновременно выполнять однотипные операции, называемые ядрами, для большого объема данных, сгруппированных в нити и блоки [19]. Несмотря на более низкую тактовую частоту мультипроцессоров (около 1000 МГц) в сравнении с центральными процессорами (более 3000 МГц), производительность программ, разработанных на основе технологии Nvidia CUDA, значительно выше. Это достигается за счет большего числа одновременно исполняемых потоков на графическом процессоре.

Анализируя решаемую нами задачу классификации облачности по данным дистанционного зондирования Земли из космоса, можно сделать вывод, что основная ее идея состоит в определении типа облачности, к которому относятся фрагменты спутниковых снимков размером 21×21 пиксель при их смещении на 1 пиксель по вертикали и горизонтали [20]. Таким образом, необходимо проклассифицировать несколько десятков миллионов фрагментов изображения, используя один и тот же



Рис. 3. Схема алгоритма классификации облачности с использованием Nvidia CUDA

Fig. 3. Scheme of cloud classification algorithm with the usage of NVidia CUDA

алгоритм-классификатор (ядро). Следовательно, данная задача идеально ложится на концепцию технологии Nvidia CUDA и может быть эффективно распараллелена [21]. При этом ядром программы является вероятностная нейронная сеть, принимающая решение относительно принадлежности классифицируемого фрагмента изображения к одной из разновидностей облачности на основе рассчитанных значений его текстурных признаков.

Количество одновременно исполняемых потоков зависит как от решаемой задачи, так и от характеристик видеопроцессора. Поэтому нами была предложена универсальная методика инициализации количества нитей в блоке t и размера сетки блоков g_x и g_y в соответствии с параметрами классифицируемого изображения (ширины w и высоты h) и видеокарты (количество нитей на блок m). Основная суть методики заключается в следующем:

1. Если $w \leq m$, то $t = m$, $g_x = 1$ и $g_y = h$.
2. Если $w > m$, то $t = m$.
 - 2.1. Пока $w \bmod t \neq 0$ $t = t - 1$.
 - 2.2. $g_x = w \text{ div } t$ и $g_y = h$.

Для полноразмерных спутниковых снимков MODIS с пространственным разрешением 250 м, имеющих размеры $w = 5146$ и $h = 8120$, и при использовании видеокарты GeForce GTX 780 с $m = 1024$ количество нитей в блоке $t = 284$, а размерность сетки $g_x = 19$ и $g_y = 995$. При этом в соответствии с CUDA GPU Occupancy Calculator [22] значение $t = 284$ является близким к оптимальному, что предполагает высокую производительность алгоритма классификации.

Структура же алгоритма классификации облачности претерпевает существенные измене-

ния в связи с использованием технологии Nvidia CUDA. Схема выполнения программы, основанной на применении данной технологии параллельных вычислений, показана на рис. 3. Как видно, основным отличием базового алгоритма от адаптированного под вычисления на графических процессорах является отсутствие внешнего цикла при классификации. Изображение и обучающая выборка полностью загружаются в память видеокарты, где происходит параллельная обработка нескольких тысяч фрагментов спутникового снимка. Поскольку общее количество таких фрагментов велико, то видеокартой производится внутреннее планирование вычислений. После обработки последней группы фрагментов результаты классификации выгружаются из памяти видеокарты, и остается только перекрасить изображение в цвета разновидностей облачности, заданных легендой.

Модифицированный с помощью технологии Nvidia CUDA алгоритм классификации облачности был апробирован с использованием видеокарты GeForce GTX 780, имеющей 12 мультипроцессоров со 192 потоковыми процессорами каждый. Тактовая частота процессоров у данной модели видеокарты составляет 863 МГц. Время, затраченное на классификацию облаков на полноразмерном спутниковом снимке MODIS, составило немногим больше 30 мин. Таким образом, использование персональных компьютеров, оснащенных современными видеокартами, позволяет достаточно оперативно решать сложные вычислительные задачи, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Реализация алгоритма с использованием MPI

Использование технологии MPI позволяет представить задачу классификации как серию независимых подзадач классификации, выполняемых на нескольких процессах [23]. В отличие от технологий, рассмотренных выше, MPI предполагает физическое разделение данных, т. к. каждый процесс обладает своей собственной памятью. Алгоритм классификации одного изображения допускает существование двух подходов к распараллеливанию на основе MPI: на основе разделения входного массива на фрагменты, которые обрабатываются независимо каждым процессом, и специализации каждого вычислительного процесса на определенном или определенных классах. В последнем случае каждый процесс получает данные целиком, однако рассчитывает отклики сети только к части классов. Рассмотрим оба подхода подробнее.

1. Выполнение классификации независимых фрагментов

Один из процессов производит считывание графического файла. Входной массив пикселей необходимо разделить на n пересекающихся областей, где n – количество используемых процессов (или размер коммуникатора MPI_COMM_WORLD). Необходимость дублирования части данных на границах фрагментов обусловлена алгоритмом вычисления текстурных характеристик, который использует набор смежных пикселей для расчета текстурных характеристик области 21×21 . На рис. 4 показан пример наложения данных при их распределении для соседних вычислительных потоков.



Рис. 4. Распределение строк изображения по процессам

Fig. 4. Distribution of image rows between processes

Каждый из процессов вызывает представленную в разделе «Алгоритм» процедуру классификации. Фактически изменение производительности с помощью этого метода получается за счет того, что каждый процесс работает индивидуально с фрагментом снимка, который, очевидно, гораздо меньше целого изображения.

После того как каждый процесс получил массив, хранящий идентификаторы наиболее вероятных классов для своего региона, один из процессов объявляется корневым и получает номера классов от всех процессов в коммуникаторе. Такое объединение достаточно просто получается вызовом MPI_Gather, аргументами которой являются все

массивы с номерами классов во всех потоках и массив корневого процесса, в который записывается результат классификации. Работа алгоритма может быть проиллюстрирована блок-схемой на рис. 5.

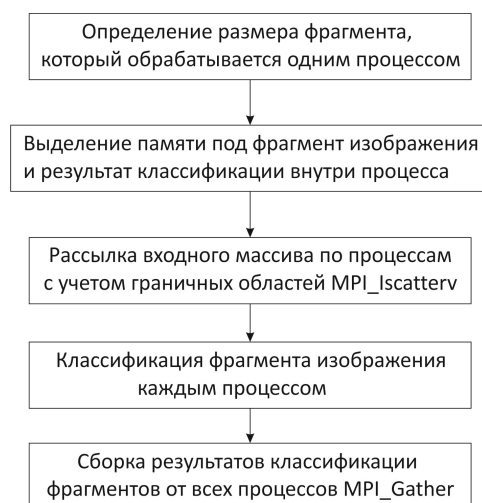


Рис. 5. Блок-схема первого подхода по распределению вычислений с помощью технологии MPI

Fig. 5. Block-scheme of the first approach on processing distribution with MPI

2. Распределение классов между процессами

Другим возможным вариантом расчета может быть связывание вычислительных процессов не с распределением данных, а с распределением задач, например первый процесс рассчитывает суммарные отклики первого класса, второй процесс – второго класса и т. д. Если процессов достаточно много, то можно связать процессы с первым уровнем модели (уровнем образцов), а не со вторым – уровнем классов. Если процессов меньше, чем классов, то один процесс может быть связан с несколькими классами. В любом случае для каждого окна получается вектор откликов на каждый класс. Если процесс не ассоциирован с каким-то классом (с этим классом связан другой процесс), то в этом векторе на позиции этого класса стоит нуль. Так как каждый процесс обрабатывает всё изображение целиком, то перед запуском процедуры анализа процесса, считавший массив пикселей из файлов, осуществляет его передачу всем процессам целиком, используя неблокирующее широковещание MPI_Ibcast.

После расчета степени принадлежности для каждой области формируется массив, размерностью $27 \times S$, где S – размер изображения, содержащий первые 27 значений – суммарные отклики на первый класс, вторые 27 значений – суммарные отклики на второй класс для первой области и т. д.

Полученные таким образом матрицы вероятностей от всех процессов объединяются с помощью редукции MPI_Reduce с операцией MPI_MAX в корневом процессе, который дополнительно должен найти наибольший элемент, означающий наибольшую вероятность принадлежности к эталонам

класса в редуцированном массиве. Расположение (индекс) наибольшего элемента совпадает с идентификатором искомого класса. Подобный подход проиллюстрирован на рис. 6.

В таблице приведены данные по производительности алгоритмов на суперкомпьютерном кластере НИ ТПУ «СКИФ-ТПУ1», использующем узлы с процессорами Intel Nehalem 4C X5570 2.93 GHz. Тестирование показало близкую производительность подходов по распределению вычислений с помощью технологии MPI, с некоторым преимуществом первого подхода, применяющего распределение вычислений.

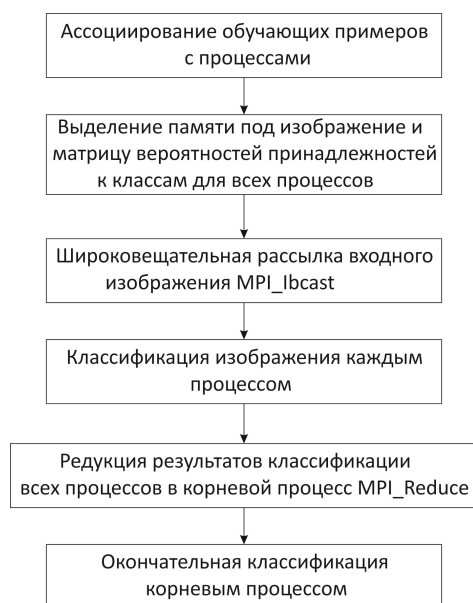


Рис. 6. Блок-схема второго подхода по распределению вычислений с помощью технологии MPI

Fig. 6. Block-scheme of the second approach on processing distribution with MPI

Таблица. Производительность алгоритмов MPI

Table. MPI algorithm performance

Число узлов Number of nodes	Распределение данных Data distribution	Распределение задач Task distribution
2	12 ч (h) 25 мин (min)	12 ч (h) 40 мин (min)
4	6 ч (h) 14 мин (min)	6 ч (h) 37 мин (min)
8	3 ч (h) 11 мин (min)	3 ч (h) 29 мин (min)
16	1 ч (h) 18 мин (min)	1 ч (h) 46 мин (min)

Оба подхода первоначально используют рассылку данных, которая длится около 8–9 с. Сборка данных для первого подхода отнимает около 7–8 с, однако редукция данных второго подхода берет около 3,3 мин. Разница заключается также и в ресурсах, затрачиваемых программистом на программную реализацию подходов. В первом случае берется исходная (непараллельная) программа и запускается на каждом используемом вычислительном узле. Второй подход требует от программиста использовать массив в каждом процессе,

хранящий суммарные отклики сети, которые были вычислены внутри процесса, а затем с помощью групповой коммуникации объединять эти результаты. Эти результаты впоследствии должны быть редуцированы операцией максимум для определения самого вероятного класса для каждой области 21×21 внутри корневого процесса, указанного функцией MPI_Reduce.

Заключение

В результате проделанной работы были предложены три модификации алгоритма классификации однослойной облачности и облаков вертикального развития по данным MODIS с пространственным разрешением 250 м на основе использования различных технологий параллельных вычислений. Было установлено, что применение технологии OpenMP не позволяет решать оперативно вычислительно трудоемкие задачи, связанные с обработкой спутниковых данных. Причиной тому служит незначительный прирост производительности программных средств, разработанных при помощи данной технологии.

Технология Nvidia CUDA позволяет на порядок увеличить быстродействие разработанных с ее помощью алгоритмов и их программных реализаций. Следует отметить, что время классификации полно-размерного спутникового снимка MODIS было существенно ниже при применении графического процессора, даже ниже, чем при использовании кластера «СКИФ-ТПУ1». Однако использование данной технологии ограничено теми случаями, когда требуется обработать большое количество одинаковых данных достаточно простым алгоритмом.

Использование технологии MPI для распараллеливания алгоритмов предоставляет более гибкие возможности, чем Nvidia CUDA, поскольку позволяет работать с распределением не только данных, но и задач. При этом первый вариант применения технологии MPI для параллельной классификации спутниковых снимков MODIS оказался более производительным, что видно из таблицы.

В результате сравнения трех технологий параллельной обработки данных можно сделать вывод, что оперативная обработка спутниковых данных возможна даже на персональных компьютерах при использовании графических процессоров общего назначения. Для крупных же вычислительных центров или при наличии нескольких вычислительных узлов наиболее эффективным является комплексное использование технологии MPI и Nvidia CUDA, поскольку возможности распараллеливания алгоритмов в этом случае гораздо шире.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-07-31018 мол_а и № 14-07-31090 мол_а. Работа выполнена в рамках программы по повышению конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета, проект ВИУ ИК 118.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Потапов В.П., Попов С.Е. Высокопроизводительные алгоритмы радиометрической калибровки и преобразования порядка следования данных отдельных каналов сенсора EO-1 Hyperion // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 4. – С. 286–289.
- Bankert R.L. Cloud classification of AVHRR imagery in maritime regions using a probabilistic neural network // J. Appl. Meteor. – 1994. – V. 33. – P. 909–918.
- A study of cloud classification with neural networks using spectral and texture features / B. Tian, M.A. Shaikh, M.R. Azimi-sadjadi, T.H. Vonder Haar, D.L. Reinke // IEEE Trans. Neural Networks. – 1999. – V. 10. – P. 138–151.
- Zhuo W., Cao Z., Xiao Y. Cloud classification of ground-based images using texture-structure features // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2014. – V. 31. – P. 79–92.
- Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – V. 57 (2). – P. 137–154.
- Neumann L., Matas J. A method for text localization and recognition in real-world images // Proc. of the 10th Asian Conf. on Computer Vision. – Queenstown, New Zealand, 2010. – P. 770–783.
- Болотова Ю.А., Спицын В.Г., Рудометкина М.Н. Распознавание автомобильных номеров на основе метода связанных компонент и иерархической временной сети // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – № 2. – С. 275–280.
- Савин Г.И., Телегин П.Н., Шабанов Б.М. Кластеры Беовульф // Известия вузов. Электроника. – 2004. – № 1. – С. 7–12.
- Параллельные вычисления CUDA. URL: <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (дата обращения: 17.09.2015).
- Полетаев С.А. Параллельные вычисления на графических процессорах. Конструирование и оптимизация параллельных программ. – Новосибирск: Изд-во ИСИ СО РАН, 2008. – 332 с.
- Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных. – М.: Мир, 1989. – 360 с.
- Astafurov V.G., Laikom D.N., Skorokhodov A.V. Software system for cloud classification according to MODIS satellite images // Proc. SPIE 9292 of 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1984426> (дата обращения: 11.09.2015).
- Specht D.F. Probabilistic neural networks // Neural Networks. – 1990. – V. 3. – P. 109–118.
- Haralick R.M. A texture-context feature extraction algorithm for remotely sensed imagery // Proc. IEEE Decision and Control Conf. – Clearwater Beach, USA, 1971. – P. 650–657.
- Weszka J., Dyer C., Rosenfeld A. A comparative study of texture measures for terrain classification // IEEE Trans. Syst. Man. And Cybern. – 1976. – V. SMC-6. – № 4. – P. 269–285.
- Unser M. Sum and difference histograms for texture classification // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – 1986. – V. PAMI-8. – P. 118–125.
- The OpenMP® API specification for parallel programming. URL: <http://openmp.org/wp/> (дата обращения: 17.09.2015).
- OpenMP shared memory parallel programming / M.S. Mueller, B.M. Chapman, de B.R. Supinski, A.D. Malony, M. Voss. – Berlin: Springer, 2008. – 448 p.
- Боресков А.В., Харламов А.А. Основы работы с технологией CUDA. – М.: ДМК «Пресс», 2010. – 232 с.
- Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Применение нейросетевых технологий для классификации облачности по текстуре снимков MODIS высокого разрешения // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 5. – С. 39–49.
- Зацепин П.М., Гефке Д.А. Применение технологии Nvidia CUDA для обучения и декодирования скрытых Марковских моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 115–121.
- CUDA GPU Occupancy Calculator. URL: http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/CUDA_Occupancy_calculator.xls (дата обращения: 10.11.2015).
- MPI Standard official page. URL: <http://mpi-forum.org> (дата обращения: 10.11.2015).

Поступила 12.11.2015 г.

UDC 004.032.24, 004.032.26

USING DIFFERENT COMPUTING SYSTEMS TO SOLVE THE AUTOMATIC CLOUD CLASSIFICATION PROBLEM ACCORDING TO MODIS SATELLITE DATA BY PROBABILISTIC NEURAL NETWORK

Aleksey V. Skorokhodov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: vazime@yandex.ru

Sergey V. Aksenov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634034, Russia; Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: axyonov@tpu.ru

Andrey V. Aksenov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634034, Russia. E-mail: image@tpu.ru

Dmitriy N. Laykom,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634034, Russia. E-mail: wedun@tpu.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to develop algorithms and software to classify the cloud types based on single-layer cloud on the satellite images received from MODIS spectral radiometer used in Terra and Aqua remote sensing Earth satellites with the usage of high-performance systems.

The main aim of the study: effective and fast analysis of 5416–8120 single-layer cloud full scale satellite images received from MODIS spectral radiometer with the help of the probabilistic neural network detecting 27 cloud types.

The methods used in the study. To carry out the task the authors used the methods of paralleling the processing, neurocomputing, computer vision and texture analysis algorithms, classification algorithms, technologies of high-performance processing for multi-core shared memory systems (OpenMP), graphics processing units (CUDA) and distributed systems (MPI).

The results. The classifying procedure based on probabilistic neural model compares all the fragments from the given image with the patterns from the training set classified by experts. It needs to compare texture features of each fragment with features of some thousands patterns and therefore it leads to significant time costs. The algorithm allows splitting the given input into a set of small images that can be processed independently by some computational devices and devices supporting the processing of simultaneous tasks. The paper compares the performance of three approaches for parallel processing that are multi-thread computation based on multi-core central processing units (CPUs), multi-thread computation based on graphics processing units (GPUs) and distributed processing implemented by computational cluster. The latter uses worksharing between different processes with independent address spaces and the approach includes two methods for speed-up the processing based on data distribution and task sharing. Each approach was described in detail and its performance was estimated by analysis of MODIS' full scale image. It's shown that the usage of distributed processing or/and multi-thread GPU computation for performance of single-layer cloud classification task based on probabilistic neural model has significant performance advantages not only in comparison with the classic sequential algorithm but also with its multi-thread version for many-core CPUs.

Key words:

Cloud classification, parallel computing, satellite imagery, MODIS, supercomputer, graphical processing unit, neural network.

The reported study was funded by RFBR, according to the research projects No. 14-07-31018 MOL_A and No. 14-07-31090 MOL_A. The research was performed as a part of the program to improve the competitiveness of the National Research Tomsk Polytechnic University, project No. VIU IC 118.

REFERENCES

1. Potapov V.P., Popov S.E. Vysokoproizvoditelnye algoritmy radiometricheskoy kalibrovki i preobrazovaniya poryadka sledovaniya dannykh ot delnykh kanalov sensora EO-1 Hyperion [High-performance algorithms for radiometric calibration and conversion of the order of the data of individual channels sensor EO-1 Hyperion]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 4, pp. 286–289.
2. Bankert R.L. Cloud classification of AVHRR imagery in maritime regions using a probabilistic neural network. *J. Appl. Meteor.*, 1994, vol. 33, pp. 909–918.
3. Tian B., Shaikh M.A., Azimi-sadjadi M.R., Vonder Haar T.H., Reinke D.L. A study of cloud classification with neural networks using spectral and texture features. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1999, vol. 10, pp. 138–151.
4. Zhuo W., Cao Z., Xiao Y. Cloud classification of ground-based images using texture-structure features. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2014, vol. 31, pp. 79–92.
5. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57 (2), pp. 137–154.
6. Neumann L., Matas J. A method for text localization and recognition in real-world images. *Proc. of the 10th Asian Conf. on Computer Vision*. Queenstown, New Zealand, 2010. pp. 770–783.
7. Bolotova Yu.A., Spitsyn V.G., Rudometkina M.N. Raspoznavanie avtomobilnykh nomerov na osnove metoda svyaznykh komponent i ierarhicheskoy vremennoy seti [License plate recognition on the basis of the connected components and hierarchical temporal network]. *Computer optics*, 2015, vol. 39, no. 2, pp. 275–280.
8. Savin G.I., Telegin P.N., Shabanov B.M. Klasteriy Beovulf [Beowulf clusters]. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2004, no. 1, pp. 7–12.

9. *Parallelnye vychisleniya CUDA* [Parallel computing CUDA]. Available at: <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (accessed 17 September 2015).
10. Poletaev S.A. *Parallelnye vychisleniya na graficheskikh protsesorakh. Konstruirovaniye i optimizatsiya parallelnykh program* [Parallel computing on graphics processors. Design and optimization of parallel programs]. Novosibirsk, ISI SO RAN Publ., 2008. 332 p.
11. Virt N. *Algoritmy i struktury dannykh* [Algorithms and data structures]. Moscow, Mir Publ., 1989. 360 p.
12. Astafurov V.G., Laikom D.N., Skorokhodov A.V. Software system for cloud classification according to MODIS satellite images. *Proc. SPIE 9292 of 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1984426> (accessed 11 September 2015).
13. Specht D.F. Probabilistic neural networks. *Neural Networks*, 1990, vol. 3, pp. 109–118.
14. Haralick R.M. A texture-context feature extraction algorithm for remotely sensed imagery. *Proc. IEEE Decision and Control Conf.* Clearwater Beach, USA, 1971. pp. 650–657.
15. Weszka J., Dyer C., Rosenfeld A. A comparative study of texture measures for terrain classification. *IEEE Trans. Syst. Man. And Cybern.*, 1976, vol. SMC-6, no. 4, pp. 269–285.
16. Unser M. Sum and difference histograms for texture classification. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1986, vol. PA-MI-8, pp. 118–125.
17. *The OpenMP® API specification for parallel programming*. Available at: <http://openmp.org/wp/> (accessed 17 September 2015).
18. Mueller M.S., Chapman B.M., de Supinski, B.R., Malony A.D., Voss M. *OpenMP shared memory parallel programming*. Berlin, Springer Publ., 2008. 448 p.
19. Borekov A.V., Kharlamov A.A. *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA* [Technology basics CUDA]. Moscow, DMK Press Publ., 2010. 232 p.
20. Astafurov V.G., Skorokhodov A.V. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy dlya klassifikatsii oblachnosti po teksture snimkov MODIS vysokogo razresheniya [The application of neural network technology for the classification of cloud texture high resolution MODIS images]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, no. 5, pp. 39–49.
21. Zatsepin P.M., Gefke D.A. Primenenie tekhnologii Nvidia CUDA dlya obucheniya i dekodirovaniya skrytykh Markovskikh modeley [Nvidia CUDA application to train and decode the hidden Markov models]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 115–121.
22. *CUDA GPU Occupancy Calculator*. Available at: http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/CUDA_Occupancy_calculator.xls (accessed 10 November 2015).
23. *MPI Standard official page*. Available at: <http://mpi-forum.org> (accessed 10 November 2015).

Received: 12 November 2015.

УДК 553.041, 666.189.32

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЕВРОПЕЛИТОВЫХ ПОРОД ИШИМСКОЙ СВИТЫ ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Смирнов Павел Витальевич,

аспирант, научный сотрудник Тюменского государственного нефтегазового университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

E-mail: geolog.08@mail.ru

Константинов Александр Олегович,

научный сотрудник Тюменского государственного нефтегазового университета, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Иванов Константин Сергеевич,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. E-mail: sillicium@bk.ru

Актуальность работы. Отложения ишимской свиты позднего миоцена широко распространены в пределах юга Тюменской области и характеризуются приповерхностным залеганием. Ишимская свита миоцена представляет собой слои разнотекстурного песка, перекрытые отбеленными высокодисперсными алевропелитовыми породами. Несмотря на высокий потенциал промышленного использования и значительное распространение в пределах региона, алевропелитовые породы ишимской свиты до настоящего момента не нашли практического применения. Детальное изучение вещественного состава данных отложений позволит оценить возможности их использования в тех отраслях промышленности, где востребовано кварцевое сырье тонкого измельчения с высокой дисперсностью.

Цель работы: исследование химического и минералогического состава отложений ишимской свиты для оценки возможности их использования при производстве строительных материалов (пеностеклокерамики) на примере пород, представленных в естественном обнажении долины р. Бегила Заводоуковского района Тюменской области.

Методы исследований: полевые исследования, макроскопические исследования, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеноструктурный анализ, петрографический анализ, электронная микроскопия, технологические испытания.

Результаты: изучен вещественный состав и физические свойства алевропелитовых пород ишимской свиты, представленных в естественном обнажении долины р. Бегила Заводоуковского района Тюменской области. В исследуемых породах выявлено высокое содержание мелкодисперсного SiO_2 и высокая удельная поверхность частиц, что позволяет рассматривать их в качестве своеобразного аналога микрокремнезема и маршалита. Установлена возможность производства пеностеклокерамики из алевропелитовых пород ишимской свиты юга Тюменской области. Сочетание выдержанности пород на значительной площади и приповерхностного залегания делает возможным их использование в качестве сырья при производстве керамических изделий строительной отрасли региона.

Ключевые слова:

Ишимская свита, алевропелиты, маршалит, микрокремнезем, Тюменская область, пеностеклокерамика.

Введение

На юге Тюменской области, в пределах Тобол-Ишимского междуречья, на склонах долин малых рек широко распространены выходы отбеленных высокодисперсных алевропелитовых пород мощностью до 4–5 м. Данные отложения по внешнему виду напоминают одновременно диатомит, каолинит и мел. В рамках классической стратиграфии Западной Сибири рассматриваемые породы завершают разрез ишимской свиты миоцена [1–4].

Ишимская свита миоцена представляет собой целостную толщу, включающую в себя слои разновозрастного песка и перекрывающие их отбеленные алевропелитовые породы [2].

Пески нижней части ишимской свиты широко используются строительной промышленностью региона [2], в то время как алевропелитовые породы, несмотря на высокий потенциал практическо-

го использования, до настоящего времени не нашли широкого применения.

Важно отметить, что даже внешняя диагностика рассматриваемых пород без использования специального оборудования позволяет обнаружить значительное содержание в них высокодисперсного кварца. Исследование возможностей практического использования алевропелитовых пород ишимской свиты предполагает изучение вещественного состава и физических свойств данных отложений.

Объекты исследования

Породы для исследований были отобраны из естественного обнажения в долине р. Бегила Заводоуковского района Тюменской области (рис. 1). В пределах рассматриваемого участка ишимская свита объединяет слои разнотекстурного песка и от-

беленных трепловидных алевропелитовых пород, считается геологически целостной и представляет единую свиту мощностью до 20 м [2] (рис. 2).

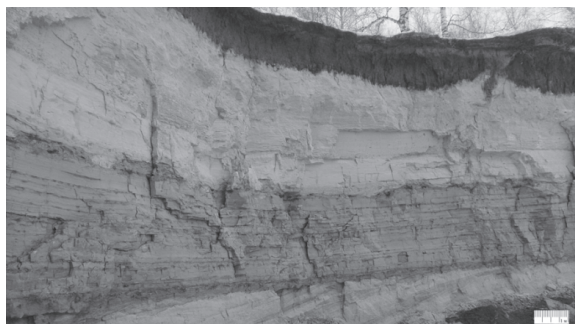


Рис. 2. Обнажение пород ишимской свиты, долина р. Бегилы

Fig. 2. Outcrop of Ishim formation, Begila river valley

Макроскопически порода верхней части светло-серая, почти белая, очень рыхлая, сильно пачкает пальцы при контакте, с массивной текстурой (рис. 3). Порода сложена мелким обломочным материалом, представленным мелкоалевритовой и

пелитовой фракциями. Присутствуют немногочисленные мелкие чешуйки слюд и хлоритов. Отмечаются редкие мелкие и очень мелкие черные, реже бурые, зерна углефицированного растительного детрита, обломочные зерна рудных минералов и железисто-марганцевые конкреции. Порода ниже лежащей толщи – более темная и характеризуется плитчатой отдельностью, по плоскостям которой наблюдаются признаки ожелезнения – тонкие пленки гидрооксидов железа.

Результаты и обсуждение

Влажность алевропелитовой породы в естественном залегании невелика и не превышает 3–5 %. Основную массу породы составляют фракции крупной пыли размером 0,01–0,05 мм и средней пыли размером 0,005–0,01 мм (52,85 % и 31,5 % соответственно). Песчаная фракция практически отсутствует (2–3 %).

По данным химического анализа установлено, что основными компонентами алевропелитовой породы ишимской свиты, представленной в обнажении долины р. Бегилы, являются SiO_2 , Al_2O_3 ,

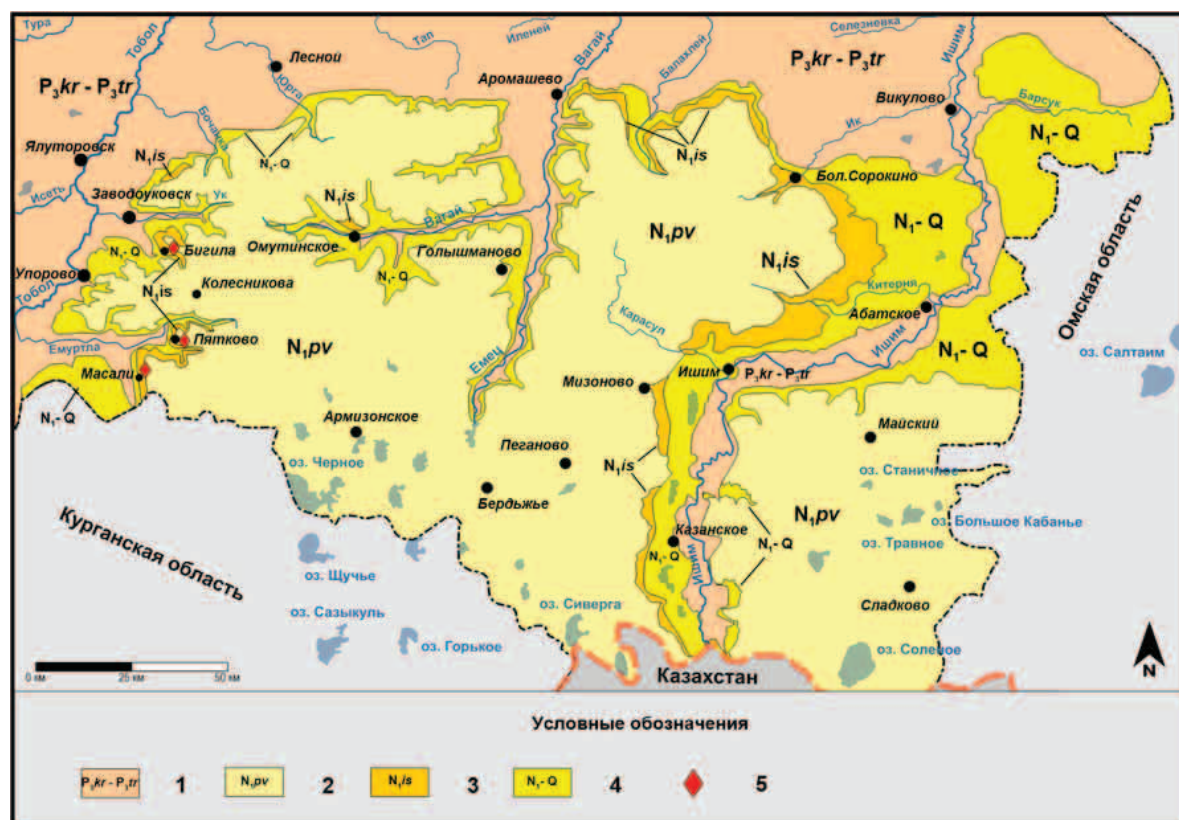


Рис. 1. Карта-схема распространения неоген-четвертичных отложений в пределах юга Тюменской области: 1 – отложения куртамышской (P_3kr) и туртасской (P_3tr) свит олигоцена; 2 – отложения павлодарской свиты неогена (N_{1pv}); 3 – отложения ишимской свиты неогена (N_{1is}); 4 – нерасчлененные неоген-четвертичные отложения; 5 – известные обнажения ишимской свиты в пределах рассматриваемой территории

Fig. 1. Schematic map of the spread of the Neogene-Quaternary sediments within the south of the Tyumen region: 1 – sediments of Kurtamyshskaya (P_3kr) and Turtasskaya (P_3tr) formations of the Oligocene; 2 – sediments of Pavlodar formation of the Neogene (N_{1pv}); 3 – sediments of Ishim formation of the Neogene (N_{1is}); 4 – undifferentiated Neogene-Quaternary sediments; 5 – known outcrops of Ishim formation within the studied area

Таблица 1. Результаты определения химического состава пород обнажения в долине р. Бегилы**Table 1.** Results of determination of rock chemical composition (outcrop of Begila river valley)

№ п/п Sr. No	№ обр. Sample	ППП LOI	Химический состав/Chemical composition, %																			
			Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO	ZnO	Rb ₂ O	SrO	ZrO ₂	BaO
1	Б-1	2,51	1,71	0,59	7,90	81	0,05	–	1,74	1,04	1,29	0,010	0,007	0,039	2,400	0,003	0,006	0,006	0,009	0,030	0,054	0,027
2	Б-2	5,52	0,85	1,32	14,80	67	0,05	0,01	2,13	0,85	1,32	0,025	0,017	0,035	5,800	0,005	0,009	0,012	0,013	0,025	0,055	0,030
3	Б-3	3,42	1,93	1,02	10,90	74	0,03	–	2,05	1,87	1,27	0,019	0,015	0,042	3,520	0,004	0,007	0,007	0,010	0,034	0,064	0,036
4	Б-4	3,61	1,42	1,20	11,60	74	0,04	0,01	2,29	1,00	1,41	0,019	0,015	0,049	3,590	0,005	0,007	0,010	0,011	0,025	0,068	0,029

Примечание. Пустые графы – содержание ниже предела определения или отсутствие. ППП – потери при прокаливании.

Note. Empty graphs – content is lower than the determination limit or absence. LOI – lose on ignition.

Fe₂O₃. Для верхней части алевропелитовой подстилки характерны наибольшие содержания диоксида кремния и наименьшие оксидов литофильных элементов (Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, Cr₂O₃ и др.) (табл. 1).

В образцах отбеленных алевропелитов определен минеральный состав по данным интерпретации рентгеноструктурного анализа (РСА) (табл. 2). Порода сложена, главным образом, обломками кварца, калиевого полевого шпата или микроклина, кислым плагиоклазом или альбитом.

Таблица 2. Валовый минеральный состав алевропелитовой породы обнажения в долине р. Бегилы, %**Table 2.** Results of determination of total mineral composition, % (outcrop of Begila river valley)

Кварц Quartz	Микроклин Microcline	Альбит Albite	Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Корренсит (тосудит) Corrensite (tosudite)	Гидрослюда Hydrous mica	ССО Mixed layer clay
81,0	3,0	10,0	0,4	1,0	0,8	3,1	0,7

Содержание глинистых минералов, входящих в состав изучаемой породы, крайне низкое (табл. 1), оно определено с большой погрешностью.

В целом в виде количественной оценки можно принять, что суммарная концентрация глинистых минералов в этом образце близка к 6 % (табл. 2). В термин «гидрослюда» включаются не только собственно глинистые минералы из группы смектитов, но и мелкие, довольно многочисленные терригенные обломки гидролизированных слюд, хорошо видимые в образце.

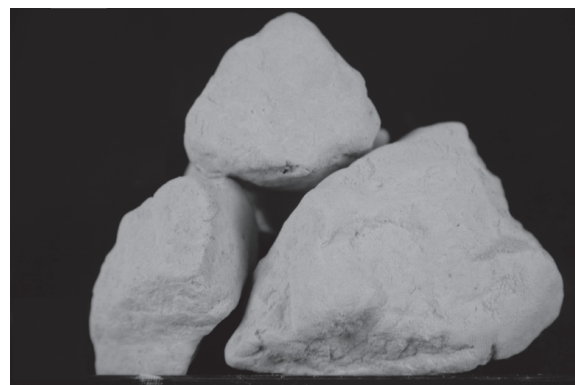
Преобладающим минералом в составе глинистой фракции (табл. 3) является гидрослюда (около 50 %). На втором месте, по вкладу в сумму глинистых минералов, находится хлорит (22 %). Затем следует корренсит и/или тосудит (12 %). И, наконец, меньше всего в составе глин – каолинит и ССО (по 8 % каждый). ССО – это смешанослойный минерал, состоящий из чередующихся друг с другом слоев, представленных гидрослюдой и монтмориллонитом. Корренсит и тосудит – также смешанослойные минералы, но в их состав входят чередующиеся слои хлорита и вермикулита (корренсит) или хлорита и монтмориллонита (тосудит). Так как только на основании данных РСА

эти смешанослойные минералы трудно отличить друг от друга, в табл. 3 приводятся названия обоих минералов.

Таблица 3. Результаты определения минералов глинистой составляющей образца, %**Table 3.** Results of determination of minerals of clayed part, %

Каолинит Kaolinite	Хлорит Chlorite	Корренсит (тосудит) Corrensite (tosudite)	Гидрослюда Hydrous mica	ССО Mixed layer clay
8,0	22,0	12,0	50,0	8,0

По данным петрографического анализа, исследуемая рыхлая порода обладает пелито-алевритовой структурой с размером частиц менее 0,01–0,001 мм, единично – до 0,03 мм. Обломки представлены преимущественно кварцем и тончайшими чешуйками гидрослюды (рис. 4). Обломки пород гидрослюдистого и хлоритового состава. Округлые обособления размером до 0,03 мм, желтоватые в параллельных николях, принадлежат ССО. Рудные минералы представлены более-менее равномерно рассеянной вкрапленностью пирита, составляющего не более 1–2 %, и рудным минералом, не определяющимся вследствие полной лейкоксенизации (составляет около 5 %). Акцессорные представлены титанистыми минералами с размером кристаллов до 0,01 мм, составляющими 4–5 %.

**Рис. 3.** Внешний вид алевропелитовой породы**Fig. 3.** Aleuropelitic rock appearance

С целью определения величины удельной поверхности изучаемой породы произведены измерения методом БЭТ (методом Брунауэра, Эммета и Теллера) на автоматизированном приборе ASAP-2400 Micromeritics и анализ изотерм адсорбции азота при 77 К. Величины удельной поверхности значительно варьируются (от 12 м²/г) и достигают для отдельных образцов нижней части алевропелитовой подсвиты 31,5 м²/г.

По нашему мнению, вещественный состав и физико-химические свойства могут предопределить широкое использование данных пород в качестве сырья для производства различных строительных материалов. Геологические условия формирования этих толщ, по всей видимости, обеспечивали высокую дисперсность породы, обычно не характерную для отложений преимущественно кварцевого состава.

В этой связи представляют интерес результаты исследований А.И. Траутвайн и В.В. Ядыкиной [5], которыми установлена прямая связь между степенью измельчения породы и её реакционной способностью. Реакционная способность кремне-содержащих материалов связана с уменьшением размера частиц и последующим изменением концентрации активных адсорбционных и протонодонорных центров. Обычно с целью повышения реакционной способности исходную породу активизируют с помощью мелкого помола. Дисперсность кварца в сырьевых смесях приобретает еще большее значение, так как от дисперсности зависит скорость взаимодействия со щелочами во время обжига [5–10].

Высокое содержание в исследуемой породе мелкодисперсного SiO₂ открывает перспективы получения пеностеклокерамики на её основе (табл. 4). Нами исследовалась принципиальная возможность замены опал-кristобалитовой породы при изготовлении образцов пеностеклокерамики по

технологии, разработанной для опал-кristобалитовых пород [11, 12]. В соответствии с запатентованным способом (патент РФ № 2464251) [13] образцы пеностеклокерамики изготовлены при 800 °С без использования плавня.

Табл. 4. Основные характеристики образцов пеностеклокерамики, полученных из алевропелитов

Table 4. Main characteristics of the foam-glass ceramics samples, obtained from aleuro-pelitic rocks

№ п/п Sr. No.	Физические свойства Physical properties	Значение Value
1	Средняя плотность, кг/м ³ Average density, kg/m ³	890
2	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	15,5
3	Водопоглощение (по массе), % Water absorption (by weight), %	1,2
4	Теплопроводность, Вт/(м·К) Thermal conductivity, W/(m·K)	0,23

По внешнему виду материал напоминает застывшую стеклянную пену кремового цвета (рис. 5). Поры преимущественно закрытые, что подтверждает низкое значение водопоглощения полученных образцов. В исходном виде порода пригодна для получения конструкционно-теплоизоляционного материала в виде блочных изделий. Для получения теплоизоляционных материалов со средней плотностью 300–400 кг/м³ и теплопроводностью порядка 0,07–0,10 Вт/(м·К) необходимы дополнительные исследования влияния фракционного состава породы на свойства материала.

Высокая дисперсность, кремнистый состав и высокая удельная поверхность позволяют рассматривать исследуемые породы в качестве аналога микрокремнезема и маршалита, которые широко используются в производстве различных видов

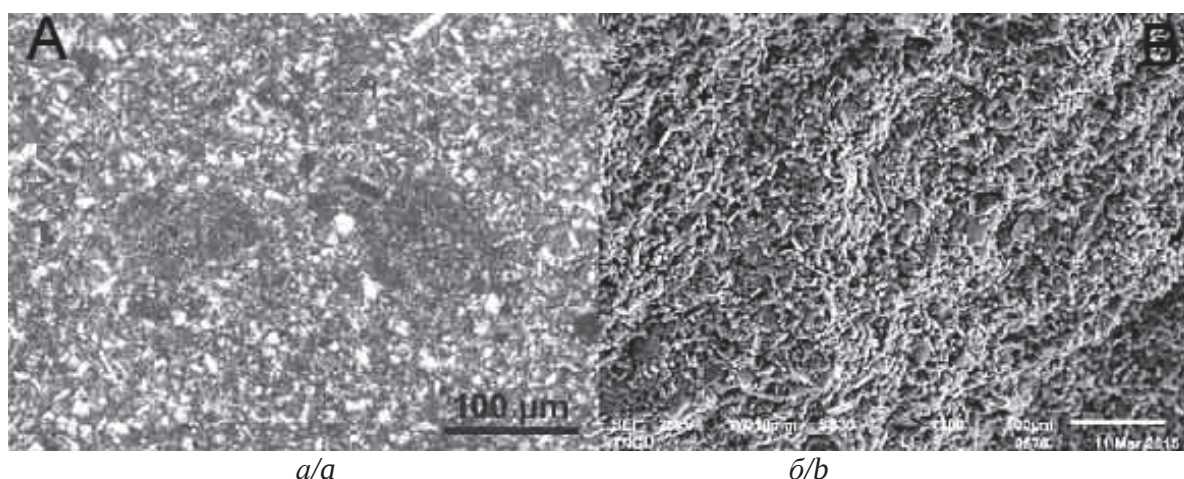


Рис. 4. Общий вид алевропелитовой породы в шлифе (а) и общий вид кремнистой породы под электронным микроскопом (б) (фотографии: В.Т. Чернышев, ТюмГНГУ)

Fig. 4. General view of aleuropelitic rock in slides (a) and general view of silica rock under electron microscope (b) (photos by V.T. Chernyshev, Tyumen State Oil and Gas University)

строительных материалов: гранулированных теплоизоляционных материалов, сухих строительных смесей, бетонов, пенобетонов, цементов, керамики, облицовочной и тротуарной плитки, черепицы, резин, пластмасс и др. [14–17].



Рис. 5. Образец пеностеклокерамики, полученный при вспенивании исследованной породы

Fig. 5. Foam glass-ceramics sample obtained when frothing the rock

Микрокремнезём – ультрадисперсный кварцевый материал, отход газоочистки металлургических печей при производстве кремнийсодержащих сплавов. Микрокремнезем занимает важное место в производстве особо прочных бетонов. Внесение микрокремнезёма увеличивает прочность и морозостойкость бетонов за счет низкой проницаемости и повышения плотности цементного камня, а также способствует уменьшению расхода цемента за счет связывания выделяемой извести. При производстве портландцемента микрокремнезём выступает в роли полифункциональной добавки, увеличивающей его водостойкость, прочностные характеристики и устойчивость к коррозии [18–20]. Массовая доля диоксида кремния, реализуемого на рынке, варьируется от 65 до 95 %, удельная поверхность – не менее 12 м²/г. В этом отношении исследуемые породы и микрокремнезём аналогичны.

Широкое применение в производстве строительных материалов получил маршалит, который представляет собой природный ультрадисперсный кварц с размерами частиц 0,07–0,03 мм, содержа-

щий не менее 98 % SiO₂. Ввиду высокой степени химической чистоты, спектр использования маршалита очень широк: стекольная и химическая промышленность, металлургия, производство строительных материалов и активных добавок.

Существенным отличием маршалита от рассматриваемых пород является значительное содержание в последних оксидов литофильных металлов – Fe и Al. Однако маршалит легко поддается обогащению отмучиванием, воздушной сепарацией и химическому обогащению с выделением мономинеральных фракций и одновременным снижением содержания Fe₂O₃ до 0,02–0,004 %. Подобный опыт может быть полезен при практическом использовании исследуемых пород.

Очевидно, что опыт использования микрокремнезема и маршалита может быть перенесен и на исследуемые кварцевые алевропелитовые породы.

Юг Тюменской области является регионом, испытывающим дефицит высококачественных строительных материалов [21]. Проблема ограниченности местной сырьевой базы является одним из основных факторов, лимитирующих развитие строительного рынка региона. Широкое применение добавок-заменителей микрокремнезема позволило бы существенно снизить расход цемента и, соответственно, повысить доступность жилья в регионе.

Практический интерес также может представлять использование исследуемых пород в качестве наполнителя для красок, шпаклевок, смесей для наливных полов и т. д.

Заключение

Отложения ишимской свиты миоцена широко представлены на юге Тюменской области. Они залегают близко к дневной поверхности, что делает рентабельным их промышленное использование в качестве заменителя микрокремнезема при производстве высококачественных строительных материалов.

Результаты изучения вещественного состава и физических свойств алевропелитовых пород ишимской свиты позволили выявить высокое содержание мелкодисперсного SiO₂ и высокую удельную поверхность частиц.

Выявлена возможность использования алевропелитовых пород ишимской свиты при производстве пеностеклокерамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астапов А.П. Континентальный олигоцен-неоген Тобол-Ишимского междуречья: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Новосибирск, 1977. – 185 с.
2. Астапов А.П., Дрожащих Н.Б., Генералова Р.С. Палеогеография палеогена и неогена юга Тюменской области в связи с оценкой перспектив территории на нерудное сырье: отчет по теме / ЗапСибНИГНИ. – Тюмень, 1979. – С. 15–17.
3. Стратиграфия, палеомагнитная и палинологическая характеристики континентальных отложений палеогена и неогена юго-запада Западной Сибири / З.Н. Гнибиденко, В.С. Волкова, О.Б. Кузьмина, Ж.А. Доля, И.В. Хазина, А.В. Левичева // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 596–605.
4. Унифицированные региональные стратиграфические схемы неогеновых и палеогеновых отложений Западно-Сибирской равнины: объяснительная записка // Ф.Г. Гурари, В.С. Волкова, А.Е. Бабушкин, А.Г. Головина, В.П. Никитин, А.И. Некрасов, А.В. Кривенцов, Ж.А. Доля, Ю.М. Колыхалов, З.Н. Гнибиденко / СНИИГТИМС. – Новосибирск, 2001. – 84 с.
5. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В. Исследования влияния режимов измельчения на реакционную способность минеральных порошков // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – Вып. 61–62. – С. 248–254.
6. Ядыкина В.В. Управление процессами формирования и качеством строительных композитов с учетом состояния поверхности дисперсного сырья. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 374 с.
7. Effect of sample preparation on the chemical composition and morphology of alkali-silica reaction products / K.F. Hanson, T.J. Van Dam, K.R. Peterson, L.L. Sutter // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – V. 1834. – P. 1–7.
8. Diamond S., Thaulow N. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate // Cement and Concrete Research. – 1974. – V. 4. – № 4. – P. 591–607.
9. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a portland cement clinker / N. Bouzoubaa, M.H. Zhang, A. Bilo-deau, V.M. Malhotra // Cement and concrete research. – 1997. – V. 27. – № 12. – P. 1861–1874.
10. Верещагин В.И., Мельникова И.Г., Могилевская Н.В. Активация спекания строительной керамики на основе легкоплавкого и тугоплавкого глинистого сырья добавками маршалита // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 6. – С. 109–117.
11. Иванов К.С. Новый изоляционный материал для термостабилизации грунтов // Криосфера Земли. – 2011. – № 4. – С. 120–122.
12. Иванов К.С., Радаев С.С., Селезнева О.И. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла // Стекло и керамика. – 2014. – № 5. – С. 15–19.
13. Способ получения ячеистого строительного материала: пат. Рос. Федерация № 2464251; заявл. 19.10.2010; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 3 с.
14. Khalil Kh.A. Pore structure and surface area of hardened cement pastes containing silica fume // Materials Letters. – 1996. – V. 26. – Iss. 4–5. – P. 259–264.
15. Kirkbride T.W., Helland S. Condensed silica fume in concrete. – London: Federation Internationale de la Precontrainte, 1988. – 32 p.
16. Fryda H., Serivener K., Bier T. Relation between setting properties of LCC and interaction within the binder system // UNITEC. – 1997. – V. 3. – P. 1315–1323.
17. Myhre B., Sprudberg B. The use of microsilica in refractory castables // International Seminar on Refractory Materials. – Tehran, 1997. – 12 p.
18. Electrical properties, physico-chemical and mechanical characteristics of fly ash-limestone-filled pozzolanic cement / M. Heikal, H. El-Didamony, I.M. Helmy, F. Abd El-Raouf // Silicates Industriels Journal. – 2004. – V. 69. – № 11–12. – P. 93–102.
19. Xu G.R., Zou J.L., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ // Water Research. – 2009. – V. 43. – Iss. 11. – P. 2885–2893.
20. Власов В.К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя // Бетон и железобетон. – 1988. – № 10. – С. 9–11.
21. Кравченко Е.Г. Малоэтажное жилищное строительство в Тюменской области: проблемы и перспективы // Сборник материалов X научной конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2011. – С. 253–256.

Поступила 22.12.2015 г.

UDC 553.041, 666.189.32

COMPOSITION AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE ALEUROPELITIC ROCKS OF ISHIM FORMATION (SOUTHERN PART OF TYUMEN REGION). PROSPECTS FOR THEIR INDUSTRIAL APPLICATION

Pavel V. Smirnov,

Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskogo Street, Tyumen, 625000, Russia. E-mail: geolog.08@mail.ru

Alexander O. Konstantinov,

Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskogo Street, Tyumen, 625000, Russia. E-mail: konstantinov.alexandr72@gmail.com

Konstantin S. Ivanov,

Institute of the Earth Cryosphere of the Siberian Branch of the RAS, 86, Malygina Street, Tyumen, 625026, Russia. E-mail: sillicium@bk.ru

The relevance of the discussed issue. Sedimentary rocks of the Ishim formation of the Miocene are highly widespread within the south of the Tyumen region and are characterized by near-surface bedding. Ishim formation of the late Miocene constitutes of layers of even-grained sand, covered with superfine aleuropelitic bleached rocks. Despite the high potential for industrial use and a significant spread within the south of the Tyumen region, aleuropelitic rocks of the Ishim formation have not found practical application up to the present day. A detailed study of the material composition of these deposits will help to evaluate the possibility of their use in the industries where superfine quartz is relevant.

The main aim of the study: studies of chemical and mineralogical composition of the aleuropelitic sediments of Ishim formation in order to assess the possibility of their use in the production of building materials (foam glass-ceramics) on the example of samples present in the natural exposure in the valley of the river Begila in Zavodoukovsk district of the Tyumen region.

The methods used in the research: field investigations, macroscopic studies, X-ray fluorescence analysis, X-ray analysis, petrographic analysis, electron microscopy, technological tests.

The results. The authors investigated the material composition of aleuropelitic rocks of Ishim formation and their physical properties. High content of fine SiO_2 in the studied rocks and high specific surface allow us to examine them as a counterpart of microsilica and marshallit, which opens prospect for production of various building materials from these rocks. Combination of thickness of sequence over a wide area, and near-surface occurrence can serve as a prerequisite to their widespread practical use.

Key words:

Ishim formation, aleuropelites, marshallit, microsilica, Tyumen region, foam glass-ceramics.

REFERENCES

1. Astapov A.P. *Kontinentalnyy oligotsen-neogen Tobol-Ishimskogo mezhdurechya*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Continental oligocene-neogene of Tobol-Ishim interfluvium. Author's abstract Cand. Diss.]. Novosibirsk, 1977. 185 p.
2. Astapov A.P., Drozhzhichikh N.B., Generalova R.S. *Paleogeografiya paleogena i neogena yuga Tyumenskoy oblasti v svyazi s otsenkoy perspektiv territorii na nerudnoe syrye: otchet po teme* [Paleogeography of Paleogene and Neogene of Tyumen region in the connection with prospects of non-metallic mineral raw materials]. Tyumen, 1979, pp. 15–17.
3. Gnibidenko Z.N., Volkova V.S., Kuzmina O.B., Dolya Zh.A., Khazina I.V., Levicheva A.V. Stratigrafiya, paleomagnitnaya i palinologicheskaya kharakteristiki kontinentalnykh otlozheniy paleogena i neogena yugo-zapada Zapadnoy Sibiri [Stratigraphic, Paleomagnetic, and Palynological data on the Paleogene-Neogene continental sediments in southwestern West Siberia]. *Geologiya i geofizika*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 596–605.
4. Gurari F.G., Volkova V.S., Babushkin A.E., Golovina A.G., Nikitin V.P., Nekrasov A.I., Kriventsov A.V., Dolya Zh.A., Kolykhailov Yu.M., Gnibidenko Z.N. *Unifitsirovannyye regionalnye stratigraficheskie skhemy neogenovykh i paleogenovykh otlozheniy Zapadno-Sibirskoy ravniny: obyasnitel'naya zapiska*. [Unified regional stratigraphic schemes of Neogene and Paleogene sediments of the West Siberian plain]. Novosibirsk, SNIIGGIMS, 2001. 84 p.
5. Trautvain A.I., Yadykina V.V. Issledovaniya vliyaniya rezhimov izmelcheniya na reaktsionnyuyu sposobnost mineralnykh poroshkov [Studies on the effect of grinding on the reactivity of the mineral powders]. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2013, iss. 61–62, pp. 248–254.
6. Yadykina V.V. *Upravlenie protsessami formirovaniya i kachestvom stroitelnykh kompozitov s uchetom sostoyaniya poverkhnosti dispersnogo syrya* [Management of the processes of formation and the quality of composites based on state of the surface of particulate materials]. Moscow, ASV Publ., 2009. 374 p.
7. Hanson K.F., Van Dam T.J., Peterson K.R., Sutter L.L. Effect of sample preparation on the chemical composition and morphology of alkali-silica reaction products. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, vol. 1834, pp. 1–7.
8. Diamond S., Thaulow N. A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 1974, vol. 4, no. 4, pp. 591–607.
9. Bouzoubaa N., Zhang M.H., Bilodeau A., Malhotra V.M. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a portland cement clinker. *Cement and concrete research*, 1997, vol. 27, no. 12, pp. 1861–1874.
10. Vereshchagin V.I., Melnikova I.G., Mogilevskaya N.V. Aktivatsiya spekaniya stroitel'noy keramiki na osnove legkoplavkogo i tugoplavkogo glinistogo syrya dobavkami marshallita [Activation of sintering of construction ceramics based on refractory and fusible clay raw material with additives of marshallite]. *Vestnik of TSUAB*, 2014, no. 6, pp. 109–117.
11. Ivanov K.S. Novyy izolyatsionnyy material dlya termostabilizatsii gruntov [Novel insulation material for thermal stabilization of soils]. *Earth's Cryosphere*, 2011, no. 4, pp. 120–122.

12. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. Diatomity v tekhnologii granulirovannogo penostekla [Diatomites in granular foam-glass technology]. *Steklo i keramika*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 15–19.
13. Melnikov V.P., Ivanov K.S. *Sposob polucheniya yacheistogo stroitel'nogo materiala* [A method of producing foamed construction material]. Patent RF, no. 2464251, 2010.
14. Khalil Kh. A. Pore structure and surface area of hardened cement pastes containing silica fume. *Materials Letters*, 1996, vol. 26, iss. 4–5, pp. 259–264.
15. Kirkbrid T.W., Helland S. *Condensed silica fume in concrete*. London, Federation Internationale de la Precontrainte, 1988. 32 p.
16. Fryda H., Serivener K., Bier T. Relation between setting properties of LCC and interaction within the binder system. *UNITECR*, 1997, vol. 3, pp. 1315–1323.
17. Myhre B., Srudlberg B. The use of microsilica in refractory castables. *International Seminar on Refractory Materials*, Tehran, 1997. 12 p.
18. Heikal M., El-Didamony H., Helmy I.M., Abd El-Raouf F. Electrical properties, physico-chemical and mechanical characteristics of fly ash-limestone-filled pozzolanic cement. *Silicates Industriels Journal*, 2004, vol. 69, no. 11–12, pp. 93–102.
19. Xu. G.R., Zou J.L., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$. *Water Research*, 2009, vol. 43, iss. 11, pp. 2885–2893.
20. Vlasov V.K. Mekhanizm povysheniya prochnosti betona pri vvedenii mikronapolnitelya [The mechanism of increase of concrete strength at introduction of micro-fillers]. *Concrete and reinforced concrete*, 1988, no. 10, pp. 9–11.
21. Kravchenko E.G. Maloetazhnoe zhilishchnoe stroitelstvo v Tyumenskoy oblasti: problemy i perspektivy [Low-rise housing construction in the Tyumen region: problems and prospects]. *Sbornik materialov X nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i soiskateley* [Proc. X Scien. Conf. of young scientists, graduate students and applicants]. Tyumen, 2011. pp. 253–256.

Received: 22 December 2015.

УДК 519.7: 624.1

О СОЗДАНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИПЕРСЕТЕЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДОВ

Токтошов Гулжигит Ысакович,

кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории
системного моделирования Института вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. Академика Лаврентьева, 6. E-mail: tgi_tok@rambler.ru

Инженерная инфраструктура современных городов представляет собой весьма сложную иерархическую систему, создание которой предполагает структуризацию процесса проектирования на отдельные подсистемы с учетом перспективы их развития и реконструкции. При проектировании коммуникаций должны учитываться технические возможности и экономическая целесообразность их построения на соответствующем месте, от которых зависит эффективность функционирования предполагаемой коммуникации. В связи с этим актуальным является создание специализированных геоинформационных систем, позволяющих оценить проектную стоимость коммуникаций до начала строительно-монтажных работ и учесть пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Цель работы: разработка методики создания специализированных геоинформационных систем на основе гиперсетевого подхода, позволяющей проектировщику или пользователю при организации и управлении инженерной инфраструктурой городов учитывать пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Методы исследования: метод дискретизации области в построении модели местности; методы теории графов для поиска оптимальных маршрутов при прокладке инженерных сетей; методы теории гиперсетей для описания многоуровневости инженерной инфраструктуры современных городов.

Результаты: предложена гиперсетевая технология создания специализированных геоинформационных систем, основанная на модели гиперсетей и структурировании процесса проектирования на отдельные подсистемы. Такой подход, в отличие от традиционных способов создания ГИС-технологий, позволяет организовать оптимальное пространственное размещение инженерных сетей различного назначения на этапе их проектирования с учетом их взаимосвязи и взаимозависимости. Предлагаемая в настоящей работе методика создания специализированных ГИС, основанная на теории гиперсетей, позволяет учитывать особенности реальной местности, вида и назначения проектируемой коммуникации.

Ключевые слова:

Инженерная инфраструктура, область размещения, геоинформационная система, граф, гиперсеть.

Введение

Городская инженерная инфраструктура – это сложная система, состоящая из систем водо-, тепло- и газоснабжения, канализации, транспорта и дорог, электроснабжения, электросвязи и т. д. Другими словами, основу инженерной инфраструктуры составляет инженерно-энергетический комплекс, обеспечивающий теплом, водой, электроэнергией и связью жилые и общественные здания.

Для организации и управления территориально распределенными инженерными сетями различного назначения активно применяются геоинформационные системы (ГИС) [1–6], позволяющие полностью или частично автоматизировать различные виды работ.

Анализ литературных источников показывает, что ГИС играет ключевую роль в различных областях науки, таких как оптимизация городских телекоммуникационных [1] и транспортных [2, 3] сетей, модернизация систем электро- и газоснабжения [4], создание единой карты инженерных сетей города [5], размещение технических объектов на заданной территории [6] и других.

При этом цена ошибки при применении ГИС на этапе проектирования достаточно высока. Например, при строительстве и создании инженерных коммуникаций незначительное отклонение в расчетах может привести к серьезным последствиям –

к увеличению расходов на реализацию проекта, снижению уровня безопасности для пользователей проектируемых объектов. С другой стороны, в условиях дефицита свободных территорий в современных городах инженерная инфраструктура, имеющая сетевую структуру, может быть использована как самостоятельно, так и в качестве подосновы для наложения других систем. Так, например, опоры сетей воздушных линий электропередач обычно используются и для прокладки сетей электросвязи.

Таким образом, актуальным является создание специализированных ГИС, позволяющих проектировщику или пользователю при организации и управлении сетевой инфраструктуры городов учитывать многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. В настоящей работе в качестве математической основы для создания таких систем предлагается использовать гиперсетевый подход, что позволит на этапе проектирования организовать оптимальное пространственное размещение инженерных сетей различного назначения с учетом многоуровневости процесса их построения.

Математическое обеспечение создания ГИС

В настоящее время проблема оптимального проектирования сложных территориально распределенных систем городской инженерной инфра-

структуры является одной из самых актуальных в строительной отрасли. Данная проблема включает постановку, формализацию и типизацию проектных решений, процедур и процессов проектирования в интегрированной технологии ГИС и САПР (систем автоматизированного проектирования) [7]. Немаловажным аспектом в создании интегрированной технологии ГИС и САПР, опирающейся на общую математическую и информационную основу, является их универсальность. Однако в настоящее время создание универсальных интегрированных ГИС и САПР затруднено, так как специализированные программы моделирования и расчета являются недостаточно открытыми и их интеграция на основе современных принципов и технологий невозможна [8]. С другой стороны, для создания такой технологии требуется достаточно универсальный математический аппарат, который позволит на этапе проектирования учесть пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Известно, что в качестве математической основы создания ГИС и САПР используются цифровые модели местности (ЦММ) [9, 10]. Наиболее распространенным методом построения ЦММ является переход к дискретному аналогу местности на основе сеточной технологии. Далее на основе существующих методов оптимизации находятся пути на сетке карты для оптимального пространственного размещения инженерных сетей различного назначения.

Для решения проектных задач по организации и управлению инженерными сетями различного назначения в основном используются методы теории графов [11–13]. При этом результаты проектирования на одном из уровней не применяются в качестве исходных данных для последующих уровней. Таким образом, в процессе проектирования не учитываются взаимосвязи и взаимозависимости между уровнями. Другими словами, графы используются для каждого из уровней отдельно. В результате предполагаемый вариант конфигурации проектируемой сети может не являться оптимальным, а в ряде случаев при эксплуатации может привести к нестабильной работе проектируемой сети.

В связи с этим в настоящей работе в качестве математической основы создания специализированной ГИС предлагается гиперсетевая технология оптимизации строительства сетевой инфраструктуры современных городов [14–17].

Понятие «гиперсеть» впервые было введено в работе [14] в качестве математической модели для описания сложных сетевых структур, в первую очередь сетей связи. Гиперсети, в том числе иерархические, нестационарные и структурированные, в отличие от графов, описывают системы, имеющие более двух образующих множеств с учетом реализации одной структуры в другой. В настоящей работе, в отличие от [14–17], гиперсети применяются для оптимизации процесса проектирования

сетевой инфраструктуры современных городов, имеющей многоуровневую структуру.

Следует отметить, что применение модели гиперсетей в качестве альтернативы существующим методам и технологиям создания ГИС расширяет функциональную возможность проектируемых ГИС за счет использования возможностей гиперсетевого подхода для анализа и организации многоуровневых систем.

Гиперсеть

Учет многоуровневости процесса проектирования инженерных сетей современных городов, обусловленной вложенностью сетей, можно произвести за счет разделения на первичную и вторичную сеть – так же как и в сетях связи. При этом топология первичной сети описывается графом $PS=(X,V;P)$, в котором вершины X соответствуют узлам существующей сети, а ребра V – ветвям. Каждое ребро V первичной сети PS представляется в виде трасс для прокладки линий проектируемой сети. Вторичная сеть $WS=(Y\subseteq X,R;W)$ соответствует структуре проектируемой сети, у которой множества вершин Y разбиты на два непересекающихся подмножества, т. е. $Y=I\cup J$ и $I\cap J=\varnothing$. Первое подмножество $I=\{1,...,m\}$ содержит вершины, соответствующие пунктам, где могут быть размещены источники целевой продукции. Второе подмножество $J=\{1,...,n\}$ содержит вершины, соответствующие потребителям. Ребра R графа вторичной сети WS соответствуют физическим линиям (трубы, кабели и т. д.), которые непосредственно осуществляют перемещение целевой продукции от источника к потребителям. Взаимодействие этих подсистем определяется двухуровневой гиперсетью [15].

Определение 1. Гиперсеть $S=(X,V,R;P,F,W)$ включает следующие объекты:

- $X=(x_1, x_2, ..., x_n)$ – множество узлов (вершин);
- $V=(v_1, v_2, ..., v_g)$ – множество трасс;
- $R=(r_1, r_2, ..., r_m)$ – множество физических линий (труб, кабелей и т. п.);
- $P: V \rightarrow 2^X$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $v \in V$ множество вершин $P(v) \subseteq X$. Тем самым отображение P определяет граф первичной сети $PS=(X,V;P)$;
- $F: R \rightarrow 2_{PS}^V$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $r \in R$ множество трасс $F(r)$, образующих простой маршрут в графе $PS=(X,V;P)$. Причем семейство 2_{PS}^V содержит такие подмножества, трассы которых составляют связную часть графа PS . Отображение F определяет гиперграф $FS=(V,R;F)$. Множество всех маршрутов $F(r)$, отображающее каждому ребру $r \in R$ графа WS единственный маршрут в графе PS , назовем вложением графа WS в PS .
- $W: r \rightarrow 2^{P(F(r))}$ – отображение, сопоставляющее каждому элементу $r \in R$ множество вершин $W(r) \subseteq P(F(r))$ в графе PS , где $P(F(r))=Y$ – множество вершин в PS , инцидентных трассам $F(r) \subseteq V$. Отображение W определяет граф вторичной сети $WS=(Y,R;W)$.

Из определения гиперсети следует, что математическая модель возможных трасс соответствует первичной сети $PS=(X,V;P)$, а конфигурация проектируемой сети – вторичной сети $WS=(X,R;W)$. Взаимодействие этих сетей определяется гиперсетью S , т. е. ветвь $v \in V$ инцидентна ребру $r \in R$ тогда и только тогда, когда соответствующее ребро r вторичной сети реализовано по ветви v соответствующей трассы $F(r)$.

Иерархическая гиперсеть

Использование обычной гиперсети ограничивается двумя уровнями. На практике процесс построения инженерной сети целесообразно разбить на ряд этапов, или уровней детализации (более чем двух), на каждом из которых решают соответствующие задачи, в зависимости от результата предыдущего уровня. Другими словами, на каждом этапе генерируется некоторое множество возможных вариантов, подавляющее большинство которых отбрасывается при последующем анализе ввиду невыполнения условий, налагаемых системой ограничений, или же в соответствии со стоимостной оценкой. Каждый из вариантов, отобранных на предыдущем уровне детализации, генерирует некоторое множество на последующем. Среди этого множества снова происходит сравнение и выбор, что позволяет существенно уменьшить как число просматриваемых вариантов, так и количество их сравнений между собой.

Здесь процесс проектирования инженерных сетей рассматривается как четырехуровневая иерархическая система, состоящая из следующих уровней (подсистем):

- информационное обеспечение процесса проектирования сетей (построение ЦММ);
- построение сети ситуационных или возможных трасс;
- поиск оптимальных трасс для прокладки инженерных сетей;
- реализация (размещение) инженерной сети по найденным трассам.

Каждый слой, или уровень, описывается соответствующим графом, при этом множество вершин графа верхнего слоя является подмножеством вершин нижнего слоя. Взаимодействие этих подсистем удобно описывать моделью иерархической гиперсети [16, 17].

Далее рассмотрим задачи анализа сетей при проектировании инженерных коммуникаций, соответствующих каждому иерархическому уровню. Пусть Ω – заданная территория, на которой предполагается вести строительство. Для построения модели местности и дальнейшего поиска возможных трасс предлагается перейти к дискретному аналогу области Ω , что можно сделать, например, наложением регулярной сетки [18]. На множество узлов сетки построим граф вида $PG=(X_0,G;F_0)$, в котором вершины X_0 соответствуют узлам полученной сетки Ω , а ребра G – ветвям.

Для построения сети возможных трасс и дальнейшего определения конкурирующих вариантов трассы из рассмотрения сразу же исключаются объекты и участки местности, через которые проход трассы инженерной сети либо заведомо нецелесообразен, либо вовсе невозможен. Также устанавливаются фиксированные точки и направления, проход трассы через которые обязателен.

Чтобы построить сеть ситуационных трасс для дальнейшего поиска оптимальных решений, так же как и в [19], введем области запрета $\Omega_s \subset \Omega$, $s=1,2,...,S$, заданные своими границами. В качестве областей запрета могут выступать природные участки или искусственные сооружения, проход через которые либо экономически нецелесообразен, либо технически невозможен: геодезические отметки, овраги, водные преграды, заболоченные или лесистые участки, участки социального и сельскохозяйственного назначения, существующие коммуникации (эстакады), территории промышленных предприятий, населенные пункты, территории оборонных объектов, заповедные зоны и т. д.

Кроме того, возможность прокладки маршрута ограничивается характеристиками рельефа местности – его крутизной и кривизной. Проблема кривизны рельефа может быть решена с использованием сплайнов [7, 8]. Чтобы учесть крутизну, введем следующие обозначения: α – угол между отрезком в пространстве, соединяющим некоторые пары узлов, и горизонтальной поверхностью Ω ; α_{up} – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций вверх по склону; α_{down} ($\alpha_{down} < 0$) – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций вниз по склону; α_{side} – предельно допустимый угол прокладывания коммуникаций горизонтально по склону.

Пусть $\mu = x_{j_1} v_{j_1, i+1} \dots x_{j_{i-1}, i-m} v_{j_{i-1}, i-m} x_{j_i, i+m}$ – некоторая трасса, где $j=1,2,...,n$; $i=1,2,...,m$ – множество номеров вершин (или ребер) в графе $PG=(X_0,G;F_0)$. Тогда для проектируемого вида коммуникаций и для ее трассы возможны следующие ограничения:

- 1) $\mu \subset \Omega$, $\forall j \neq k$, $i \neq r$: $k, r = \{-1; 0; 1\}$ – нахождение трассы внутри рассматриваемой области;
- 2) $\mu \not\subset \Omega_s$, $\forall j \neq k$, $i \neq r$: $k, r = \{-1; 0; 1\}$ и $\forall s$ – непрохождение трассы через области запрета;
- 3) если $\alpha \leq \alpha_{up}$, то прокладка инженерных коммуникаций вверх по склону разрешена, в противном случае – нет;
- 4) если $\alpha \geq \alpha_{down}$, то прокладка инженерных коммуникаций вниз по склону разрешена, в противном случае – нет;
- 5) если $\alpha \leq |\alpha_{side}|$, то прокладка инженерных коммуникаций горизонтально по поверхности склона разрешена, в противном случае – нет. Ясно, что в природных условиях $\{\alpha_{up}, \alpha_{down}, \alpha_{side}\} < 90^\circ$.

В общем случае $\alpha_{up} \neq \alpha_{down}$ и, как правило, $|\alpha_{side}| < \min\{\alpha_{up}, -\alpha_{down}\}$, что приводит к неравенству значений веса от узла к узлу соседнему и наоборот. Таким образом, построенный нами граф $PG=(X_0,G;F_0)$ является ориентированным.

Последние три ограничения связаны с безопасностью строительства и эксплуатацией инженерных коммуникаций, поскольку значения этих углов определяются видом и назначением инженерной коммуникации, а также свойствами грунта вдоль трассы для их прокладки.

Ограничение 2 означает, что вершины $X' \subset X_0$ графа $PG=(X_0, G; F_0)$, попавшие в какую-либо из областей Ω_s , $s=1, 2, \dots, S$, изолируются, то есть весам ребер, соединяющим данный узел со всеми соседними и наоборот, присваивается значение бесконечности. Аналогично невыполнение хотя бы одного ограничения из 3–5 для некоторого ребра равнозначно присвоению весу ребер значения бесконечности. Ребра с бесконечным весом ребер из графа $PG=(X_0, G; F_0)$ удаляются, в результате получается некоторая «дискретная плоскость с запретами», которые ограничивают прокладку инженерной сети как по плану, так и по профилю. Будем моделировать «дискретную плоскость с запретами» графом $PO=(X_1 \subseteq X_0, U; F_1)$, в котором $X_1 = X_0 \setminus X'$, $U_1 = G \setminus G'$ и $X_1 \subseteq X_0$, $U_1 \subseteq G$. Полученный граф назовём графом ситуационных (возможных) трасс для поиска оптимальных маршрутов прокладки инженерных коммуникаций.

На третьем этапе производится трассировка сети, т. е. окончательно выбираются участки для прокладки сетей от источников к потребителям. Выбор трассы для прокладки сетей зависит от конструкции, требований техники безопасности, степени застройки и от ряда других причин, характерных для конкретных инженерных сетей. Другими словами, при выборе трассы обязательно должны учитываться вид и назначение проектируемой сети. Структуре возможных трасс поставим в соответствие граф $PS=(X_2 \subseteq X_1, V; F_2)$, в котором вершина – возможные пункты размещения источников и потребителей, а ребра V – участки возможных трасс.



Рисунок. Иерархическое представление построения сетей

Figure. Hierarchical representation of construction networks

На последнем этапе выбираются параметры элементов проектируемой сети, оптимальные по некоторому критерию (стоимости, длине и т. д.). Пусть структуре проектируемой сети, удовлетворяющей некоторому критерию оптимальности, соответствует граф $WS=(X_3 \subseteq X_2, R; F_3)$, в котором вершины соответствуют местам непосредственного размещения источников и потребителей ($X_3 = I \cup J$),

а ребра R – физическим линиям. Тогда процесс проектирования инженерной сети завершится реализацией ребер графа проектируемой сети по соответствующим маршрутам графа оптимальных трасс. В общем случае взаимодействие этих подсистем (графов) моделируется иерархической 3-гиперсетью [20] (рисунок).

Структурированная гиперсеть

При большом количестве сетей и недостатке свободных территорий в современных городах целесообразно применять совместную прокладку коммуникаций по единым строительным конструкциям. Для решения задач совмещенного размещения инженерных сетей возникает необходимость преобразовать гиперсеть $S=(Y, V, R)$ по следующему правилу. В гиперсети вида S узел $y \in Y$ заменяется на граф вида $y=\{x_j^i, E_j\}$ (граф узла y структурированной гиперсети), где x_j^i – j -я вершина вторичной сети WS_i , отображенная в узел $y \in Y$ структурированной гиперсети $SA=(Y, V, G(X_i, R_i))$. Таким образом, в отличие от гиперсетей вершины вторичных сетей помещаются в узлы первичной сети независимо друг от друга, без ограничения на характер отображения.

Дадим формальное определение структурированной гиперсети. Пусть задано множество графов: $G_0=(X^0, V), G_1=(X^1, U^1), \dots, G_k=(X^k, U^k)$, соответствующее инженерным коммуникациям различного назначения. Задано также корневое дерево $T_0=(Z, R)$, где $Z=z_0, z_1, \dots, z_k$, $R=r_1, \dots, r_k$ – определяющее вложение графов G_j в G_i ($i > j$). Такое вложение, определяется также как и в гиперсетях, за тем исключением, что вершины x_k^i и x_j^i графов G_i и G_j не тождественны, а инцидентны. Очевидно, что одной и той же вершине x_k^i могут быть инцидентны несколько вершин $x_k^i=\{x_{k_1}^i, x_{k_2}^i, \dots, x_{k_s}^i\}$ из l графов $\{G_j\}$, $s=1, \dots, l$. На множестве вершин X_k^i определяется граф $L^i=\{X_k^i, E\}$. Вершины $x_{k_1}^i$ и $x_{k_s}^i$ смежны в L^i , если соответствующие графы G_{j_1} и G_{j_s} в вершине x_k^i имеют некоторую системообразующую связь $l(x_{k_1}^i, x_{k_s}^i)$. В противном случае эти вершины не смежны. Так же как и в гиперсетях, ребру $u_i^j \in G_j$ в графе G_i сопоставляется цепь или некоторая связная часть между соответствующими вершинами из G_i . Необходимо отметить, что системообразующие связи типа $\{l(x, y)\}$ могут иметь различную природу и, как правило, существенно зависят от вида ограничений, налагаемых на проектируемый тип сетей. В некоторых случаях, например в системе транспортных сетей разного типа (метро, автобус, трамвай), такими связями в транспортных мультиузлах будут тротуарные линии (пешеходные переходы). В этом случае имеет смысл рассматривать объединение всех вторичных сетей. Для некоторых задач имеет смысл рассматривать сумму всех графов гиперсети, включая первичную сеть PS , т. е. $G=G_0+G_1+\dots+G_k+L^i$. Более подробно с моделями структурированной гиперсети можно ознакомиться в работе [16]. В настоящей работе системообразующие связи типа $\{l(x, y)\}$ учитываются

в виде ограничений различного характера, которые будут представлены ниже.

Рассмотрим прямоугольную систему координат $XYZO$ с метрикой пространств ρ , выбор которой обусловлен требованием прокладки инженерных коммуникаций по координатным осям:

$$\rho(M, N) = |X_M - X_N| + |Y_M - Y_N| + |Z_M - Z_N|,$$

где $\rho(M, N)$ – расстояние между двумя точками M и N пространства $XYZO$.

При решении задачи прокладки инженерных коммуникаций различного назначения пространственное положение j -й коммуникации зададим вектором

$$T_j = (X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0}, X_{j1}, Y_{j1}, Z_{j1}, \dots, X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j}, Q_j),$$

где X_{j0}, Y_{j0}, Z_{j0} – координаты начала трассы; $X_{jK_j}, Y_{jK_j}, Z_{jK_j}$ – координаты конца трассы; X_{jM}, Y_{jM}, Z_{jM} , $M=1, K_j-1$ – координаты точек изломов трассы; K_j – число прямоугольных фрагментов в j -й трассе; Q_j – угол поворота j -й коммуникации относительно ее первоначального положения.

При решении задачи прокладки совмещенных инженерных сетей различного назначения часто приходится иметь дело с разветвленными соединениями. В этом случае целесообразно использовать более детальное описание связывающих сетей, основанное на использовании «узлов» и «линейных участков». Под узлом будем понимать точку пересечения (соединения) двух или более линейных участков связывающих сетей. Под линейным участком – совокупность всех элементов, входящих в состав соединения любых двух узлов.

Задача прокладки совмещенных инженерных сетей различного назначения в одной траншее предполагает следующие ограничения:

- ограничение на предельно допустимый размер траншеи:

$$\begin{aligned} X_M^{\min} \leq X_M \leq X_M^{\max}; Y_M^{\min} \leq Y_M \leq Y_M^{\max}; \\ Z_M^{\min} \leq Z_M \leq Z_M^{\max}; \end{aligned} \quad (1)$$

- размещения j -й коммуникации в траншее:

$$K(J) \in K(X_M, Y_M, Z_M); \quad (2)$$

- размещение однотипных коммуникаций в один ряд:

$$z_{i1} = z_{i2}, (y_{i1} = y_{i2}) \vee (x_{i1} = x_{i2}); \quad (3)$$

- обеспечение требуемого расстояния между коммуникациями различного назначения:

$$\rho(J_i, J_k) \geq [\rho]_{ik}, \quad i \neq k, \quad (4)$$

где $[\rho]_{ik}$, $\forall i \neq k$ – нормативное расстояние между коммуникациями различного назначения, определяемое соответствующими правилами безопасности [21];

- ортогональность фрагментов совместимых коммуникаций:

$$\begin{aligned} (x_{jn+1} - x_{jn})(y_{jn+1} - y_{jn}) &= 0 \vee \\ \vee (x_{jn+1} - x_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) &= 0 \vee \\ \vee (y_{jn+1} - y_{jn})(z_{jn+1} - z_{jn}) &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

- непересечения несовместимых коммуникаций друг с другом:

$$K(J_i) \cap K(J_k) = \varnothing, \quad i \neq k; \quad (6)$$

- непересечения трасс несовместимых коммуникаций друг с другом:

$$K(T_i) \cap K(T_k) = \varnothing, \quad i \neq k; \quad (7)$$

- трассы не должны проходить в зонах обслуживания коммуникаций:

$$\begin{aligned} K(T_j) \cap K(C_{c, k}^{\text{обсл.}}) &= \varnothing, \\ j &= 1, 2, \dots, J, \quad c = 1, 2, \dots, C_{\text{обсл.}} \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом введенных понятий и ограничений задача прокладки совмещенных инженерных коммуникаций формулируется следующим образом: построить S -гиперсеть $SA=(Y, V, G(X_i, R_i))$, для которой выполняется некоторый критерий оптимальности построения сетей (например, стоимость строительства, время строительства и т. п.), при ограничениях (1)–(8). Следует отметить, что варьируя ограничениями (1)–(8) и критериями оптимальности, можно получить практически любую частную постановку задач оптимизации сетей.

Заключение

Предложенная методика создания ГИС носит рекомендательный характер и может быть использована разработчиками специализированных ГИС в области проектирования и эксплуатации сетей инженерных коммуникаций различного назначения.

В качестве математической основы создания специализированных ГИС предложены модели теории гиперсетей, которые позволяют описывать пространственное расположение различных инженерных сетей, их многоуровневость и взаимодействие.

Показано, что процесс проектирования инженерных сетей нельзя рассматривать без увязки одной системы с другой. Другими словами, в задачах оптимизации сетей совместно должны решаться задачи поиска трассы для данного вида инженерной сети и размещения линий (труб, кабелей и т. п.) по найденным трассам.

В общем случае суть предлагаемой технологии создания специализированных ГИС, основанной на иерархическом представлении процесса проектирования, заключается в построении множества вариантов проектных решений на каждом уровне и усечении этого множества до некоторой целесообразной подсистемы. Такое усечение может осуществляться по критерию экономической целесообразности и технической возможности построения сети на соответствующем месте.

В целом предложенная технология, в отличие от традиционного подхода строительства инженерных сетей, позволяет учесть взаимодействие отдельных подсистем, что важно для комплексной оценки характеристик элементов проектируемой сети и области размещения на этапе их проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fry C. GIS in telecommunications // Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. Geographical information systems: management issues and applications. – Wiley, New York, 1999. – V. 2. – P. 819–826.
2. Waters N. Transportation GIS: GIS-T // Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. Geographical information systems: management issues and applications. – Wiley, New York, 1999. – V. 2 – P. 827–844.
3. Analysing the impact of network change on transport disadvantage: a GIS-based case study of Belfast / N. Blair, J. Hine, S. Murtagh, A. Bukhari // Journal of Transport Geography. – 2013. – V. 31. – P. 192–200.
4. Meehan B. Empowering electric and gas utilities with GIS. – Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2007. – 280 p.
5. Косяков С.В., Гадалов А.Б., Садыков А.М. О подходе к реализации распределенной ГИС для ведения единой карты инженерных сетей города // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 5. – Вып. 5. – С. 1–7.
6. Садыков А.М. Методы и алгоритмы поиска и оценки вариантов размещения технических объектов на городских территориях: дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 161 с.
7. Субботин С.А., Сарычев Д.С., Скворцов А.В. Интеграция технологий ГИС и САПР при создании информационной системы автомобильных дорог // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2006. – № 1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-tehnologiy-gis-i-sapr-pri-sozdanii-informatsionnoy-sistemy-avtomobilnyh-dorog> (дата обращения: 16.06.2015).
8. Сарычев Д.С. Современные информационные системы для инженерных сетей // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 358–361.
9. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps // Proceedings of the 25th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI). – San Francisco, 2011. – P. 1114–1119.
10. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кузнецов Р.Н. Определение оптимального маршрута трассы газопровода на основе карт стоимости влияющих факторов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – № 1 (13). – С. 21–27.
11. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
12. Филлипс Д., Гарсна-Диас А. Методы анализа сетей / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
13. Фрэнк Г., Фриш И. Сети, связи и потоки. – М.: Связь, 1978. – 448 с.
14. Попков В.К. Гиперсети и структурные модели сложных систем // Математические и имитационные модели сложных систем. Системное моделирование. – Новосибирск, 1981. – С. 26–48.
15. Попков В.К. Математические модели связности. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006. – 490 с.
16. Попков В.К. Применение теории S-гиперсетей для моделирования систем сетевой структуры // Проблемы информатики – 2010. – № 4. – С. 17–40.
17. Попков В.К. Структурные модели многослойных нестационарных систем // Труды X Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем» – Кыргызская Республика, 2015. – Ч. II. – С. 562–573.
18. Токтошов Г.Ы. Гиперсетевой подход к проектированию инженерных сетей // Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций». – Новосибирск, 2011. – Т. 1. – С. 167–170.
19. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Оптимизация маршрута движения в условиях пересеченной местности // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 52. – С. 401–407.
20. Токтошов Г.Ы. Гиперсети в моделировании и оптимизации совмещенной прокладки подземных инженерных коммуникаций // Проблемы информатики. – 2014. – № 1 (22) – С. 15–23.
21. СНиП II-89-90. Генеральные планы промышленных предприятий. URL: <http://www.skonline.ru/doc/784.html> (дата обращения: 23.05.2015).

Поступила 06.07.2015 г.

UDC 519.7: 624.1

ON CREATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BASED ON HYPERNETWORKS FOR THE ORGANIZATION OF THE ENGINEERING INFRASTRUCTURE OF MODERN CITIES

Gulzhigit Y. Toktoshov,

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
6, Ac. Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

E-mail: tgi_tok@rambler.ru

Engineering infrastructure of modern cities represents a rather complex hierarchical system, which involves the structuring of the design process into separate subsystems taking into account the prospects of their development and reconstruction. While designing communications the technical and economic feasibility of their construction at the appropriate place should be considered, as it impacts the efficiency of future communication. In this regard, it is urgent to create specialized geographic information systems (GIS), allowing to estimate the projected cost of utilities prior to commencement of construction works, and to take into account the spatial location of the various utilities, their multi-level nature and interaction.

The main aim of the study: development of creation concept of the specialized GIS based on model hyper networks, allowing the designer or user to consider the spatial location of the various utilities, their multi-level nature and interaction in the organization and management of engineering infrastructure of cities.

The methods used in the study: grid method in the construction of terrain models in the form of a discrete analogue of the staging area; methods of graph theory to find the optimal routes for laying of engineering networks; methods of the theory of hyper networks to describe the multi-levelness of creation of engineering infrastructure of modern cities.

The results. The authors introduced a hyper network technology of creation of the specialized geographic information systems, which is based on the hypernetwork models and structuring of the design process into separate subsystems. The proposed approach, unlike traditional methods of creation of GIS-technologies, allows organizing optimal spatial placement of engineering utilities for various purposes at the stage of their design taking into account their interrelation and interdependence.

The conclusions: the proposed method of creation of the specialized GIS, which is based on the hypernetwork models, allows taking into account special features of the real terrain, the type and purpose of the designed communication.

Key words:

Engineering infrastructure, location area, geographic information system, graph, hyper network.

REFERENCES

1. Fry C. GIS in telecommunications. In: Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. (Eds.). *Geographical information systems: management issues and applications*. Wiley, New York, 1999, vol. 2. pp. 819–826.
2. Waters N. Transportation GIS: GIS-T. In: Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D. (Eds.). *Geographical information systems: management issues and applications*. Wiley, New York, 1999, vol. 2. pp. 827–844.
3. Blair N., Hine J., Murtaza S., Bukhari A. Analysing the impact of network change on transport disadvantage: a GIS-based case study of Belfast. *Journal of Transport Geography*, 2013, vol. 31, pp. 192–200.
4. Meehan B. *Empowering electric and gas utilities with GIS*. Redlands, Environmental Systems Research Institute Publ., 2007. 280 p.
5. Kosyakov S.V., Gadalov A.B., Sadykov A.M. O podkhode k realizatsii raspredelennoy GIS dlya vedeniya edinoi karty inzhenernykh setey goroda [On the approach to the implementation of the distributed GIS for the management of common utilities city map]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 5, iss. 5, pp. 1–7.
6. Sadykov A.M. *Metody i algoritmy poiska i otsenki variantov razmeshcheniya tekhnicheskikh obektov na gorodskikh territoriyakh*. Dis. Kand. nauk [Methods and algorithms for search and assess options for placement of technical objects in the urban areas. Cand. Diss.]. Saint Petersburg, 2015. 161 p.
7. Subbotin S.A., Sarychev D.S., Ckvortsov A.V. *Integratsiya tekhnologii GIS i SAPR pri sozdaniy informatsionnoy sistemy avtomobilnykh dorog* [Integration of GIS and CAD to create an information system of highways]. *INTEREKSPO GEO-SIBIR*, 2006, no. 1. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-tehnologii-gis-i-sapr-pri-sozdaniy-informatsionnoy-sistemy-avtomobilnykh-dorog> (accessed 16 June 2015).
8. Sarychev D.S. Sovremennye informatsionnye sistemy dlya inzhenernykh setey [Modern information systems for engineering networks]. *Vestnik TGU*, 2003, no. 28, pp. 358–361.
9. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps. *Proceedings of the 25th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*. San Francisco, 2011. pp. 1114–1119.
10. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kuznetsov R.N. Opredelenie optimalnogo marshruta trassy gazoprovoda na osnove kart stoimosti vliyayushchikh faktorov [Determination of the optimal route of the gas pipeline on the basis of the factors affecting the value of cards]. *Nauch. vestn. VGASU. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2009, no. 1 (13), pp. 21–27.
11. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskiiy podkhod* [Graph theory. Algorithmic approach]. Moscow, Mir Publ., 1978. 432 p.
12. Fillips D., Garsia-Dias A. *Metody analiza setey* [Methods of analysis network]. Moscow, Mir Publ., 1984. 496 p.
13. Frenk G., Frish I. *Seti, svyazi i potoki* [Networks, communications and flows]. Moscow, Svyaz Publ., 1978. 448 p.
14. Popkov V.K. Giperseti i strukturnye modeli slozhnykh system [Hypernetwork and structural models of complex systems]. *Matematicheskie i imitatsionnye modeli slozhnykh sistem. Sistemnoe modelirovanie*. Novosibirsk, 1981, pp. 26–48.
15. Popkov V.K. *Matematicheskie modeli svyaznosti* [Mathematical models of connectivity]. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN Publ., 2006. 490 p.
16. Popkov V.K. Primenenie teorii S-gipersetey dlya modelirovaniya system setevoy struktury [Application of the theory of S-hypernetwork for modeling systems network structure]. *Problemy informatiki*, 2010, no. 4, pp. 17–40.
17. Popkov V.K. Strukturnye modeli mnogosloynnykh nestatsionarnykh system [Structural models of multi-layer non-stationary system]. *Trudy X Mezhdunarodnoy Aziatskoy shkoly-seminara «Problemy optimizatsii slozhnykh sistem»* [Proc. X Asian Int.

- Workshop on Optimization Problems of Complex Systems]. Kyrgyz Republic, 2015, part 2. pp. 562–573.
18. Toktoshov G.Y. Gipersetevoy podkhod k proektirovaniyu inzhenernykh setey [Hypernetwork approach to designing of engineering networks]. *Rossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Informatika i problemy telekommunikatsiy»* [Russian Science and Techn. Conf. Information and telecommunications issues]. Novosibirsk, 2011, vol. 1. pp. 167–170.
 19. Abramov Yu.A., Tarasenko A.A. Optimizatsiya marshruta dvizheniya v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Route optimization movement in rough terrain]. *Naukoviy visnik budivnitstva*, 2009, iss. 52, pp. 401–407.
 20. Toktoshov G.Y. Giperseti v modelirovanii i optimizatsii sovmeshchennoy prokladki podzemnykh inzhenernykh kommunikatsiy [Hypernetworks in modeling and optimization of the combined laying of underground utilities]. *Problemy informatiki*, 2014, no. 1 (22), pp. 15–23.
 21. *SNiP II-89–90. Generalnye plany promyshlennykh predpriyatiy* [Building regulations II-89–90. General plans of industrial enterprises]. Available at: <http://www.skonline.ru/doc/784.html> (accessed 23 May 2015).

Received: 6 July 2015.

УДК 621.181:620.171

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ СТенок КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ

Любимова Людмила Леонидовна,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: ll@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич,

доктор технических наук, заведующий кафедрой парогенераторостроения
и парогенераторных установок Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

Ташлыков Александр Анатольевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: tashlykov@tpu.ru

Артамонцев Александр Иванович,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок, Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: a_art@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежности и ресурса работоспособности поверхности нагрева труб паровых и водогрейных котлов.

Цель работы заключается в установлении распределения пространственно-структурной неоднородности свойств стенки котельной трубы и определении условий стабилизационного отжига.

Методы исследования: метод микротвердометрии и рентгеноструктурного анализа.

Результаты. В обеспечении ресурса работоспособности поверхностей нагрева труб паровых и водогрейных котлов, который гарантируется конструктивными и режимными параметрами эксплуатации, проведением подготовительных термических операций на этапе монтажа и пусконаладочных работ, большую роль играет структурная однородность труб поверхностей нагрева, которая может нарушаться в ходе транспортировки, хранения и эксплуатации. Надежная работа поверхностей нагрева труб паровых и водогрейных котлов обеспечивается контролем структурной однородности труб и степени локализованности дефектов, которые вскрываются в процессе дальнейшей эксплуатации в виде пор ползучести и коррозионных проявлений. По результатам исследований установлено, что исходный материал в состоянии поставки обладает существенной неоднородностью внутренних структурных напряжений, способных к перераспределению в зависимости от внешних давлений и температур, что проявляется в процессе эксплуатации в изменении жаропрочности и коррозионной стойкости поверхности. Показано, что под поверхностью стенки трубы наблюдается упрочненная диффузионная зона, ширина которой составляет порядка 200...300 мкм. Получена зависимость изменения размера диффузионной зоны от времени и температуры, и экспериментально установлен режим стабилизационного отжига, при котором устраняется неоднородность свойств диффузионной зоны. Кривая зависимости концентрации диффундирующего элемента по длине диффузионной зоны позволяет определять время отжига для получения заданной концентрации на определенной глубине стенки трубы или для полного устранения концентрационной неоднородности в результате диффузии.

Ключевые слова:

Сталь, коррозия, ресурс, микротвердость, дифракционная линия, внутренние структурные микронапряжения, отжиг.

Введение

Вопросы надежности работы теплоэнергетического оборудования и оценки его технического состояния с целью последующего прогнозирования работоспособности и ресурса относятся к числу наиболее актуальных в энергетике [1–3]. Надёжная работа поверхностей нагрева парогенераторов и котлов обеспечивается гарантированными кон-

структивными и режимными параметрами эксплуатации, проведением подготовительных термических операций на этапе монтажа и пусконаладочных работ [4, 5].

Ресурс во многом определяется структурной однородностью поверхностей нагрева, которая может изменяться в процессе транспортировки, хранения и эксплуатации в условиях развития меха-

низмов деградации за счет усталости металлов, теплового старения, коррозии, эрозии, образования и развития микротрещин [6].

Контроль структурной неоднородности труб позволяет производить оценку степени локализованности дефектов, а восстановление физических свойств трубного металла по данным диагностики обеспечивает его дальнейшую эксплуатацию без повреждений [7].

Методика исследований

Цель настоящих исследований заключается в выявлении распределения пространственно-структурной неоднородности свойств стенки котельной трубы и определении условий стабилизационного отжига. Для этого устанавливались изменения микротвердости и внутренних структурных напряжений II рода в образцах из тепловой стали Ст. 20.

Измерения микротвердости выполнены для 16 образцов, вырезанных из кольцевого среза трубы стали Ст. 20 высотой 20 мм, диаметром 50 мм и толщиной стенки 5 мм (рис. 1). В каждом из 16 образцов рентгеновским методом оценивалось распределение полей внутренних структурных напряжений II рода σ_{II} .

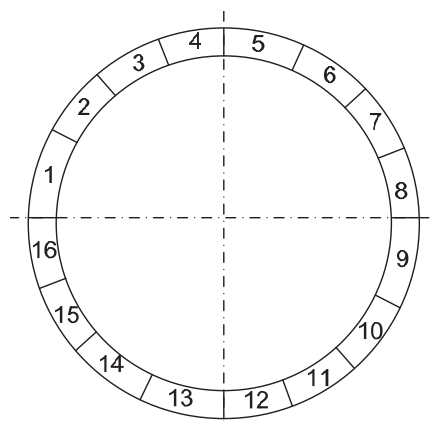


Рис. 1. Схема вырезки образцов

Fig. 1. Scheme of cuttings samples

Напряжения II рода σ_{II} оценивались на основе метода рентгеновской дифракции по физическому уширению профилей рентгеновских дифракционных линий β [8, 9]. Физическое уширение β рентгеновской линии обусловлено совокупным влиянием дисперсности m и микронапряжений n и для двух аналитических дифракционных линий представляется в виде

$$\beta_1 = \frac{(m_1 + 2n_1)^2}{m_1 + 4n_1}; \quad \beta_2 = \frac{(m_2 + 2n_2)^2}{m_2 + 4n_2}.$$

Часть истинного физического уширения первой из двух анализируемых дифракционных линий m_1 связана с дисперсностью D , а часть уширения второй дифракционной линии n_2 – с микронапряжениями II рода σ_{II} зависимостями

$$D = \frac{0,94\lambda}{m_1 \cos \theta_1}, \quad (1)$$

$$\sigma_{II} = \left(\frac{n_2}{4 \operatorname{tg} \theta_2} \right) E, \quad (2)$$

где θ – угол дифракции; E – модуль нормальной упругости; λ – длина волны используемого излучения; индексы 1 и 2 относятся к первой и второй дифракционным линиям соответственно.

Для экспериментального определения величины n_2 и разделения влияния блочности и микронапряжений на физическое уширение дифракционной линии применены следующие выражения [8, 9]:

$$\frac{m_1}{\beta_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\left[0,5r \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right) + \frac{2n_1}{\beta_1} s \right]^2}{0,5r \left(1 - \frac{4n_1}{\beta_1} + \sqrt{\frac{8n_1}{\beta_1} + 1} \right) + \frac{4n_1}{\beta_1} s}, \quad (4)$$

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\frac{1}{2r} \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1} \right) + \frac{4n_2}{\beta_2} \frac{1}{s}}{\left[\frac{1}{2r} \left(1 - \frac{4n_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{8n_2}{\beta_2} + 1} \right) + \frac{2n_2}{\beta_2} \frac{1}{s} \right]^2}, \quad (5)$$

$$\text{где } \frac{m_2}{m_1} = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = r; \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{tg} \theta_1} = s.$$

Графические зависимости $m_1/\beta_1 = f(\beta_2/\beta_1)$ и $n_2/\beta_2 = f(\beta_2/\beta_1)$, построенные на основании выражений (3)–(5), позволяют определить отношения m_1/β_1 и n_2/β_2 при известном экспериментальном значении $(\beta_2/\beta_1)_{\text{эсп}}$.

Тогда выражение (2) позволяет рассчитать значение внутренних микронапряжений второго рода.

Обсуждение результатов

Распределение внутренних микронапряжений по периметру трубы для исходных образцов в состоянии поставки представлено на рис. 2. Видно, что поверхность имеет существенную неоднородность распределения внутренних микронапряжений, изменяющихся в широком диапазоне значений, от 168 до 335 МПа. Так как происхождение внутренних напряжений связывается с неоднородностями структуры – зерен и их ориентировок, границ зерен, отдельных фрагментов, формирующих структурные напряжения, то и механические свойства различных участков поверхности будут различны. Очевидно, что труба, из которой изготовлены образцы, уже в исходном состоянии имеет предпосылки к микроповреждаемости за счет возможного трещинообразования, так как внутрен-

ние остаточные растягивающие напряжения, суммируясь с внешними нагрузками, могут превзойти предел временной прочности и изменить эксплуатационные характеристики и коррозионную стойкость.

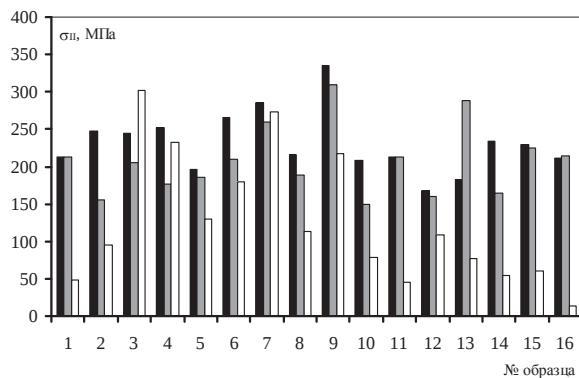


Рис. 2. Перераспределение внутренних микронапряжений в исследуемых образцах (рис. 1): ■ – в исходном состоянии; ■ – после деформирования гидравлическим прессом; □ – после термообработки в водяном паре при $t=240\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2. Redistribution of internal microstrain in the samples under investigation (fig. 1): ■ – in the original state; ■ – after straining by a hydraulic press; □ – after the heat treatment in steam at $t=240\text{ }^{\circ}\text{C}$

Пятнадцать исходных образцов (2–16) подверглись холодному пластическому деформированию при помощи гидравлического прессования, имитируя процесс гидравлических испытаний, эксплуатационных нагрузок и внешних давлений при транспортировке и хранении. Результат воздействия давлением представлен на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что после деформирования разброс значений внутренних структурных напряжений хотя и находится практически в том же диапазоне, что и для исходных образцов (от 150 до 310 МПа), однако внутренние напряжения способны к существенному перераспределению внутри этого диапазона. Например, для образца № 2 они изменились с 248 до 155 МПа, для образца № 4 – с 252 до 176 МПа. Наблюдается релаксация (уменьшение) напряжений и в других случаях.

По поводу процесса релаксации напряжений отмечается, что на границах зерен межатомные связи сильно напряжены, и когда межатомное расстояние увеличивается более чем на 10–15 %, связи следует считать разрушенными [10]. Процесс разрыва межатомных связей является ведущим на всех стадиях разрушения [11, 12]. Последствием разрушения межатомных связей является релаксация напряжений и трещинообразование [11]. В процессе возникновения и роста усталостных трещин происходит релаксация и перераспределение остаточных напряжений [13]. Наконец, из теории дифракции рентгеновских лучей (выражения (3)–(5)) следует, что физическое уширение рентгеновской дифракционной линии связано с перераспределением полей упругих напряжений: возра-

стание соответствует упрочнению, а уменьшение – зарождению микротрещин, так что образование микротрещин является релаксационным процессом, приводящим к уменьшению локальных напряжений [14].

При изготовлении, монтаже или ремонте элементов теплоэнергетического оборудования одной из важнейших контролирующих операций с целью проверки на плотность и прочность является гидравлическое испытание, которое предусматривает превышение напряжения свыше расчетного значения, определяемого на основе рабочего давления [4, 5]. Гидроиспытания проводятся в предположении, что внутрискруктурные напряжения составляют малозначительную величину и их влиянием можно пренебрегать без последствий для сплошности и разупрочнения металла, что противоречит экспериментально полученным и представленным на рис. 2 данным, а также другим результатам [15]. Наблюдаемый процесс уменьшения напряжений при гидравлическом прессовании связывается с образованием субмикротрещин, на кончике которых сразу же происходит пластическая релаксация напряжений.

С целью установления влияния внутренних напряжений на тепломеханические характеристики все образцы после пластического деформирования были подвергнуты коррозионным испытаниям, в течение которых они находились под давлением при температуре $t=240\text{ }^{\circ}\text{C}$. После коррозионных испытаний (рис. 2) разброс значений микронапряжений существенно изменился – от 14 до 302 МПа. Из этого следует, что коррозионный процесс в еще большей степени характеризуется неоднородной релаксацией внутренних структурных напряжений, что также связывается с образованием субмикротрещин в процессе разрушения материала за счет коррозии. Характерным признаком начального разрушения является релаксация напряжений [16].

Следствием неоднородности поверхности может быть различие в величинах микротвердости по периметру и длине трубы. Микротвёрдость связана с механическими свойствами сталей зависимостями: $\sigma_{0,2}=0,185\text{ } Hd$, $\sigma_s=0,37\text{ } Hd$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, кгс/мм², σ_s – предел временной прочности, кгс/мм², Hd – микротвёрдость, кгс/мм² [17]. Измерение микротвердости используется для установления локальных изменений механических свойств и степени локализованности дефектов структуры.

Исследование распределения микротвердости выполнено стандартным прибором ПМТ-3. Измерения производились по толщине стенки трубы по направлению от внешней поверхности к внутренней. Характерный результат измерения микротвердости для образца в исходном состоянии представлен на рис. 3.

В других направлениях измерений, также как и на рис. 3, на кривых видны пики микротвердости. Упрочненная зона, по данным микротвердо-

метрии, располагается непосредственно под поверхностью. Ширина упрочненных зон для разных направлений измерений составляет 200...300 мкм. В [18] также отмечается, что режим эксплуатации оставляет след в металле на наружной поверхности в виде измененного, по сравнению с матрицей, слоя. Установленная в настоящей работе неравномерность может зависеть от ряда факторов. В частности, упрочнение возникает при образовании твердых растворов: известно, что твердость чистых металлов ниже, чем твердых растворов. Таким образом, в структуре стенки трубы существует некая приповерхностная зона, пересыщенная дефектами, в пределах которой наблюдается повышенная микротвердость.

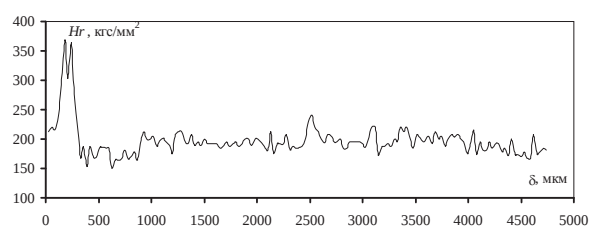


Рис. 3. Изменения микротвердости по толщине стенки трубы в исходном состоянии образца

Fig. 3. Changes of microhardness in the tube wall thickness in the initial state of the sample

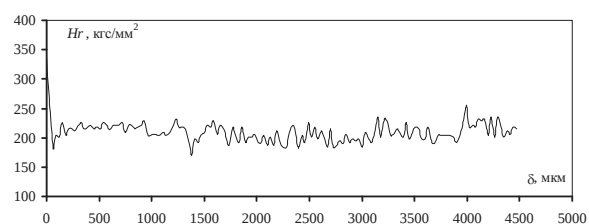


Рис. 4. Изменения микротвердости по толщине стенки трубы после первого нагрева

Fig. 4. Changes of microhardness in the tube wall thickness after the first heating

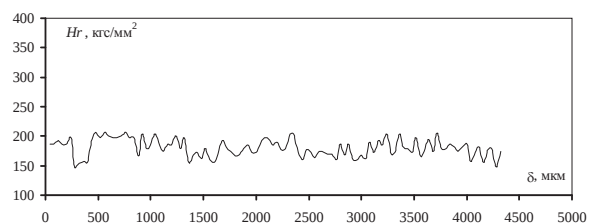


Рис. 5. Изменения микротвердости по толщине стенки трубы после второго нагрева

Fig. 5. Changes of microhardness in tube wall thickness after the second heating

Основываясь на данных [19] о том, что в области границы преобладают неравновесные концентрации, накопление атомов растворенных компонентов, а граница является местом стока вакансий, можно предположить, что наблюдаемый пик неоднородности относится только к межзеренным

границам. Внутри зерна неоднородность отсутствует [19]. Тогда ширина межзеренной границы, равная размеру упрочненной зоны в 200...300 мкм (рис. 3), представляется достаточно большой при существующих сведениях о межзеренных границах, протяженность которых оценивается величинами от 0,5...1,0 нм [20] до порядка 0,1 мкм [21] и 0,3 мкм [22].

Одновременно с этим экспериментальные данные, представленные на рис. 2, характеризующие внутризеренную неоднородность, свидетельствуют о неравномерности свойств и их перераспределении как на межзеренных границах, так и на границах зерен.

Если связывать максимум микротвердости с максимальной концентрацией атомов растворенных компонентов (рис. 3), то видно, что максимальная концентрация в упрочненной зоне меняется непрерывно до некоторого среднего значения в основном металле.

С целью устранения локальных неоднородностей структуры образец был дважды подвергнут нормализующему отжигу при температуре 500 °С. Суммарное время отжига составило 1 час.

Температурные зависимости микротвердости без термообработки (рис. 3) и после двух термоциклов (рис. 4, 5) указывают на нормализацию микротвердости и вырождение структурной неоднородности.

Изменения микротвердости при циклическом нагреве возможно объяснить диффузионным перераспределением дефектов структуры.

В нестационарных системах процесс диффузии описывается вторым законом Фика [23]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Для диффузии соответственно в двух и трех направлениях выражение (6) представляется в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2};$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2},$$

где D_x , D_y , D_z – коэффициенты вдоль осей; c – концентрация диффундирующих атомов; t – время диффузии.

Для кубических кристаллов принимается, что $D_x = D_y = D_z$.

Решение уравнения (6) имеет вид [23]:

$$\bar{x}^2 = Dt; \quad D = \frac{\bar{x}^2}{t}, \quad (7)$$

где $\bar{x}$ – ширина диффузионной зоны; D – коэффициент диффузии.

По изменению микротвердости можно оценить ширину диффузионной зоны $\bar{x}$, коэффициент диффузии D и величину $\sqrt{Dt}$.

При $\bar{x} = 300$ мкм, $t = 1,0$ ч коэффициент диффузии $D = 2,5 \cdot 10^{-7}$ см²·с⁻¹.

На основании экспериментальных данных при заданной температуре отжига 500 °С получена зависимость $x=f(\sqrt{t})$ (рис. 6).

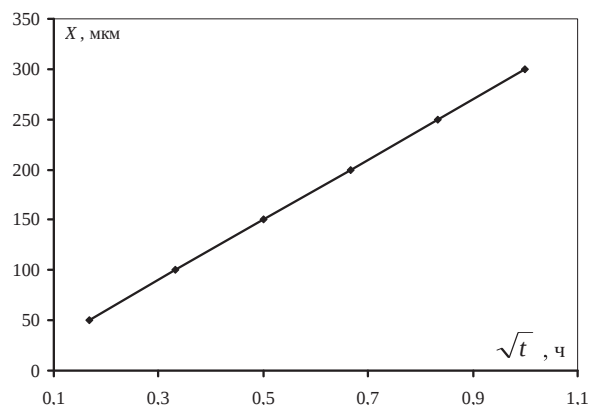


Рис. 6. Изменение диффузионной зоны X (мкм) в зависимости от $\sqrt{t}$ (ч)

Fig. 6. Changes in the diffusion zone X (micrometers) versus $\sqrt{t}$ (h)

Циклический нагрев образца привел к вырождению диффузионной зоны и выравниванию концентраций по толщине стенки трубы (рис. 5). Полученная функция зависимости концентрации диффундирующего элемента по всей длине диффузионной зоны позволяет определять время отжига для получения заданной концентрации на определенной глубине или для полного устранения концентрационной неоднородности в результате диффузии.

По всей видимости, нужно иметь в виду, что постоянно протекающий распад твердых растворов (естественное и искусственное старение), неоднородные внутренние напряжения, которые, кроме градиентов концентраций, также являются движущей силой процесса диффузии, приведут к циклическим изменениям свойств приповерхностного слоя за счет диффузии, «расшатывая» структуру и постепенно распространяясь от поверхности

по всей толщине стенки трубы, что будет проявляться в явлениях термической усталости.

Заключение

Как следует из результатов, методом рентгеноструктурного анализа в совокупности с микротвердометрией реализован контроль структурной неоднородности труб и показана локализованность дефектов структуры с целью продления ресурса работоспособности поверхностей нагрева котлов.

Представленные результаты могут быть применены при прогнозировании усталостных разрушений поверхностей нагрева при циклических механических и термических нагрузках, а экспериментальные факты диффузионного перераспределения примесей положены в основу гипотезы о диффузионной природе термомеханической усталости.

По работе можно сделать следующие основные выводы.

1. Установлено наличие неоднородности свойств стенки котельной трубы как в исходном состоянии, так и в зависимости от термомеханических и химических факторов воздействия.
2. Степень локализованности структурной неоднородности фиксируется рентгеновским методом путем измерения внутренних микронапряжений в сочетании с измерениями микротвердости.
3. В целях стабилизации структуры и восстановления физических свойств возможен нормализующий отжиг, при котором устраняется локальная структурная неоднородность. Режим стабилизирующего отжига определяется на основе микротвердометрии по заданной концентрации на определенной глубине или при полном устранении концентрационной неоднородности в диффузионной зоне.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99544а в 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приймак Е.Ю., Грызунов В.И. Особенности поведения металла конвективного пароперегревателя в процессе высокотемпературной эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 3. – С. 33–37.
2. Urtsev V.N., Morozov A.A., Kaptsan A.V. The features of austenite to ferrite transformation for carbon steel // International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Physical Metallurgy. – 1994. – № 1. – P. 251–259.
3. Гринь Е.А. Ресурс, надежность и безопасность теплосилового оборудования электростанций // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 1. – С. 76–79.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды (ПБ 10–573–03). Сер. 17. Вып. 46 – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности. 2008. – 128 с.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03–576–03). Сер. 03. Вып. 24. – М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2008. – 188 с.
6. Механизмы и причины «нетрадиционных» повреждений труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления / А.Б. Вайнман, Б.Э. Школьников, О.Д. Смиян, А.В. Жабров // Электрические станции. – 2010. – № 7. – С. 15–32.
7. Микроструктурные изменения в стали 10Х9В2МФБР при ползучести в течение 40000 часов при 600 °С / А.Э. Федосеева, П.А. Козлов, В.А. Дудко, В.Н. Скоробогатых, И.А. Щенкова, Р.О. Кайбышев // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116. – № 10. – С. 1102–1111.
8. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
9. Любимова Л.Л., Заворин А.С., Лебедев Б.В. Основы применения метода высокотемпературной рентгенографии для оценки работоспособности труб паровых котлов. – Томск: Изд-во «СТТ», 2009. – 220 с.
10. Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates // Acta Met. – 1953. – V. 1. – P. 79–92.

11. Иванова В.С. Разрушение металлов. Достижения отечественного металловедения. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
12. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Тамашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
13. К методике оценки остаточных напряжений в железнодорожных рельсах / А.Ю. Абдурашитов, М.Н. Георгиев, Н.Я. Межова, В.А. Рейхарт // Заводская лаборатория. – 1991. – № 4. – С. 57–58.
14. Распространение усталостной трещины в низкоуглеродистой мартенситной стали / Б.К. Барахтин, В.В. Макаров, П.П. Петров // Заводская лаборатория. – 1991. – № 3. – С. 30–32.
15. Прогнозирование работоспособности труб поверхностей нагрева котлов с учетом внутренних напряжений при пусконаладочных операциях / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 81–84.
16. Consideration of intrastuctural stresses in the processes connected with the effect of structural nonuniformity on corrosion damages inflicted to HeattTransfer Tubes / L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov, A.I. Artamontsev, B.V. Lebedev, R.N. Fisenko // Thermal Engineering. – 2014. – V. 61. – № 8. – P. 600–605.
17. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 190 с.
18. Богачев В.А., Старчиков С.Н., Тимонин И.Л. Применение явления намагничивания для контроля тепловой неравномерности пароперегревателей из стали 12Х18Н12Т // Электрические станции. – 2007. – № 12. – С. 22–25.
19. Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы / пер. с англ. С.Н. Горина, В.М. Половова. – М.: Мир, 1975. – 375 с.
20. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз / пер. с англ. Б.Б. Страумала; под. ред. Л.С. Швиндлермана. – М.: Машиностроение, 1991. – 448 с.
21. Аверин С.А. Оценка прочности границ зерен нержавеющей стали Х16Н15МЗБ, используемой в атомной энергетике // Перспективные материалы. – 1997. – № 1. – С. 44–47.
22. Астафьев А.А. Некоторые закономерности водородного охрупчивания конструкционных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 2. – С. 5–8.
23. Ермаков С.С. Физика металлов и дефекты кристаллического строения. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1989. – 280 с.

Поступила 18.12.2015 г.

UDC 621.181:620.171

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRUCTURAL STABILITY OF THE BOILER PIPES WALLS

Lyudmila L. Lyubimova,

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

Alexander S. Zavorin,

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

Alexander A. Tashlykov,

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

Alexander I. Artamontsev,

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

Relevance of the work is due to the need to ensure the reliability and resource efficiency of the heating surface tubes of steam and hot water boilers.

Objective: to establish the spatial distribution and structural heterogeneity of the properties of the wall of the boiler pipe and determination of the conditions of the stabilization annealing.

Methods: micro hardness and X-ray analysis.

Results. In providing the resource efficiency of the heating surface tubes of steam and hot water boilers, which is guaranteed by design and operational parameters of the operation, the preparatory thermal operations during installation and commissioning works, plays an important role structural homogeneity of heating surface tubes, which can be broken during transport, storage and operation. Reliable operation of the heating surface tubes of steam and hot water boilers is provided by the control of pipes and structural homogeneity degree of localization of defects that are revealed in the process of further exploitation as long creep and corrosion phenomena. According to the research the authors found that the starting material in the initial state has a significant internal structural heterogeneity of stresses capable of redistribution according to external pressure and temperature, which is manifested in a change in the operation of heat resistance and corrosion resistance of the surface. It is shown that under the surface of the pipe wall there is a hardened diffusion zone whose width is about 200...300 micrometers. The authors also found the dependence of the change in the size of the diffusion zone on the time and temperature. In an experimental way we set a stabilization annealing mode at which non-uniform properties of the diffusion zone are eliminated. The curve of the concentration of the diffusing element along the length of the diffusion zone allows to determine the annealing time to obtain a predetermined concentration at a certain depth of the pipe wall or to completely eliminate nonuniformity in the concentration diffusion.

Key words:

Steel, corrosion, resource, micro hardness, diffraction line, internal structural micro tension, annealing.

This work was supported by grant RFBR No. 15–08–99544a in 2015.

REFERENCES

1. Priymak E.Yu., Gryzunov V.I. Osobennosti povedeniya metalla konvektivnogo paroperegrevatelya v protsesse vysokotemperaturnoy ekspluatatsii [Features of behavior of convective superheater metal during high temperature operation]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, no. 3, pp. 33–37.
2. 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.
3. Grin E.A. Resurs, nadezhnost i bezopasnost teplosilovogo oborudovaniya elektrostantsiy [Resource, reliability and safety of heat power equipment of power stations]. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*, 2012, no. 1, pp. 76–79.
4. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii truboprovodov para i goryachey vody (PB 10–573–03)* [Rules for design and safe operation of steam and hot water (Safety regulations 10–573–03)]. Moscow, Scientific and Technical Center of Industrial Safety Publ., 2008. 128 p.
5. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii sosudov, rabotayushchikh pod davleniem (PB 03–576–03)* [Rules of construction and safe operation of vessels working under pressure (Safety regulations 03–576–03)]. Moscow, Scientific and Technical Center of Industrial Safety Publ., 2008. 188 p.
6. Vaynman A.B., Shkolnikova B.E., Smiyan O.D., Zhabrov A.V. Mekhanizmy i prichiny «netraditsionnykh» povrezhdeniy trub paroperegrevateley kotlov energoblokov sverkhkriticheskogo davleniya [Mechanisms and causes of «non-traditional» boiler superheater tubes damage supercritical units]. *Power Technology and Engineering*, 2010, no. 7, pp. 15–32.
7. Fedoseeva A.E., Kozlov P.A., Dudko V.A., Skorobogatykh V.N., Shchenkova I.A., Kaybyshev R.O. Mikrostrukturnye izmeneniya v stali 10H9V2MFBR pri polzuchesti v techenie 40000 chasov pri 600 °C [Microstructural changes in 10X9B2MΦBP steel in creep over 40000 hours at 600 °C]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 10, pp. 1102–1111.
8. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, MISIS Publ., 2002. 360 p.

9. Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Lebedev B.V. *Osnovy primeneniya metoda vysokotemperaturnoy rentgenografii dlya otsenki rabotosposobnosti trub parovykh kotlov* [Basics of using the method of high-performance X-ray to assess the tubes of steam boilers]. Tomsk, STT Publ., 2009. 220 p.
10. Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates. *Acta Met.*, 1953, vol. 1, pp. 79–92.
11. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov. Dostizheniya otechestvenno-go metallovedeniya* [The destruction of the metal. Achievements of domestic metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 168 p.
12. Regel V.R., Slutsker A.I., Tamashevskiy E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 560 p.
13. Abdurashitov A.Yu., Georgiev M.N., Mezheva N.Ya., Reykhart V.A. K metodike otsenki ostatocnykh napryazheniy v zhelezno-dorozhnykh relsakh [To evaluate the method of residual stress in rails]. *Industrial Laboratory*, 1991, no. 4, pp. 57–58.
14. Barakhtin B.K., Makarov V.V., Petrov P.P. Rasprostranenie ustalostnoy treshchiny v nizkouglerodistoy martensitnoy stali [Distribution of fatigue cracks in the low-carbon martensitic steel]. *Industrial Laboratory*, 1991, no. 3, pp. 30–32.
15. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Tashlykov A.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. Prognozirovaniye rabotosposobnosti trub po-verkhnostey nagreva kotlov s uchetom vnutrennikh napryazheniy pri puskonaladochnykh operatsiyakh [Predicting performance of heating surface tubes of boilers taking into account stress at start-up operations]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 81–84.
16. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I., Lebedev B.V., Fisenko R.N. Consideration of intrastructural stresses in the processes connected with the effect of structural nonuniformity on corrosion damages inflicted to HeatTransfer Tubes. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 8, pp. 600–605.
17. Markovets M.P. *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdsti* [Determination of mechanical properties of metals hardness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 190 p.
18. Bogachev V.A., Starchikov S.N., Timonin I.L. Primeneniye yavleniya namagnichivaniya dlya kontrolya teplovoy neravnomernosti paroperegrevateley iz stali 12H18N12T [Application to control the magnetization phenomenon of uneven heat superheater steel 12X18H12T]. *Power Technology and Engineering*, 2007, no. 12, pp. 22–25.
19. Gleyter G., Chalmers B. *Bolsheuglovyye granitsy* [Angle boundaries]. Moscow, Mir Publ., 1975. 375 p.
20. Kaur I., Gust V. *Diffuziya po granitsam zeren i faz* [Diffusion and grain boundary phases]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 448 p.
21. Averin S.A. Otsenka prochnosti granits zeren nerzhavayushchey stali H16N15M3B, ispolzuemoy v atomnoy energetike [Evaluation of the strength of the grain boundaries of stainless steel X16H15M3B used in nuclear power]. *Journal of Advanced Materials*, 1997, no. 1, pp. 44–47.
22. Astafev A.A. Nekotorye zakonomernosti vodorodnogo okhrupchivaniya konstruktsionnykh staley [Some regularities of hydrogen embrittlement of structural steels]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, no. 2, pp. 5–8.
23. Ermakov S.S. *Fizika metallov i defekty kristallicheskogo stroeniya* [Physics of metals and defects in the crystal structure]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1989. 280 p.

Received: 18 December 2015.

УДК 544.77, 542.06, 537.52

ОБРАЗОВАНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Костикова Лариса Анатольевна,

аспирант кафедры общей химии и химической технологии
Института физики высоких технологий Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: lak@tpu.ru

Шиян Людмила Николаевна,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей химии и
химической технологии Института физики высоких технологий Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: lshiy@rambler.ru

Мачехина Ксения Игоревна,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общей химии
и химической технологии Института физики высоких технологий
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: mauthksu@yandex.ru

Егоров Николай Борисович,

кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии
редких, рассеянных и радиоактивных элементов Физико-технического
института Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: egorov@tpu.ru

Исследование проблемы удаления ионов кремния из подземных вод в процессах водоочистки и возможность ионов кремния участвовать в формировании кремнийорганических коллоидных соединений, устойчивых к физико-химическим воздействиям, является актуальной задачей и имеет практическую значимость для разработчиков водоочистных устройств.

Цель работы: установить последовательность формирования кремнийорганических коллоидных соединений в процессе водо-подготовки.

Методы исследования: фотоколориметрия, рН-метрия, титриметрия, оптические методы.

Результаты. Исследовано влияние ионов кремния на образование коллоидных кремнийорганических соединений железа, присутствие которых в подземных водах снижает производительность установок водоподготовки. Показано, что ионы кремния взаимодействуют с органическими веществами гумусового происхождения с образованием устойчивых коллоидных соединений. Определено молярное соотношение ионов кремния и гуминовых веществ (критическая концентрация мицеллообразования), при котором образуются коллоидные соединения. Полученное молярное соотношение ионов кремния и гуминовых веществ составляет 7:2 соответственно. Предложена схема образования золя кремнийорганических соединений и определен дзета-потенциал, значение которого составляет -21 мВ. Процесс образования кремнийорганических коллоидных соединений в растворе продемонстрирован экспериментом по смешению двух растворов, содержащих ионы кремния и гумата натрия, с одновременным определением размеров частиц. В процессе образования кремнийорганических коллоидных соединений максимум распределения частиц изменяется в течение 30 минут в интервале от 50 до 70 нм. При этом происходит укрупнение частиц и процентное содержание частиц с размерами от 100 до 100000 нм изменяется от 68 до 80 %.

Ключевые слова:

Соединения кремния, размер частиц, кремнийорганические вещества, природные воды, очистка воды.

Введение

В работе рассмотрена способность ионов кремния, содержащихся в подземных водах Западной Сибири, участвовать в формировании кремнийорганических соединений. В природных условиях кремний мигрирует в виде различных соединений, как в ионной, так и в коллоидной форме [1–3]. В соответствии с СанПиН 2.1.4.1074–01 [4] содержание ионов кремния нормируется значением 10 мг/л. В зарубежных документах нормативы по содержанию кремния в воде отсутствуют в силу не-

актуальности вопроса. В настоящее время в отечественной нормативной базе по питьевой воде планируется аннулирование значения по предельному содержанию кремния ввиду отсутствия должной обоснованности. Тем не менее, содержание ионов кремния в подземных водах Западной Сибири влияет не только на качество вод, но и на эффективность работы установок водоподготовки [5]. Это связано с тем, что совместное присутствие ионов кремния и гуминовых веществ в воде способствует образованию кремнийорганических соединений,

Таблица. Данные количественного химического анализа подземных вод, пробы которых отобраны на территории Томской области**Table.** Data of quantitative chemical analysis of the groundwater sampled in the Tomsk region

Место отбора пробы Place the sample selection	pH	Жесткость, °Ж Water hardness, °H	Fe _{общ} , мг/л Fe _{total} , mg/l	Mn, мг/л mg/l	Si, мг/л mg/l	ПО, мгО/л mgO/l
с. Александровское Aleksandrovskoe	6,8	4,3	5,1	0,2	14,6	5,2
п. Каргасок Kargasok	6,6	4,8	7,5	0,11	19,5	5,7
п. Мыльдзино Myldzhino	6,6	6,0	11,7	0,14	18,5	6,5
Северо-Васюганское месторождение North Vasyugan field	6,5	4,9	16,3	0,19	19,7	8,8
п. Соболиное Sobolnoe	6,6	6,0	9,4	0,92	11,0	6,1
с. Подгорное Podgornoe	6,8	8,2	7,55	0,16	–	5,2
п. Шегарка Shegarka	6,8	7,0	2,15	0,09	18,3	5,5
п. Белый Яр Bely Yar	6,5	2,7	9,55	0,47	16,5	8,5
Средне-Нюрольское месторождение Mid-Nurol field	6,8	5,5	6,7	0,23	13,1	6,4
п. Могочино Mogochino	6,6	2,2	2,3	0,54	12,3	6,7
г. Кедровый Kedrovyy	6,7	4,3	5,5	0,11	12,8	7,8
Лугенецкое месторождение Luginetskoe field	6,5	3,7	4,5	0,12	11,2	6,5
с. Тунгусово Tungusovo	6,6	5,6	12,3	0,13	10,7	5,9
с. Володино Volodino	6,8	6,7	7,8	0,24	11,3	5,8
с. Молчаново Molchanovo	6,7	4,6	5,6	0,15	10,8	6,7
с. Сулзат Sulzat	6,9	3,8	4,6	0,11	11,8	6,9
п. Трубачево Trubachevo	6,4	2,9	3,9	0,09	12,3	7,3
с. Тахтамышево Takhtamyshovo	6,7	4,8	4,9	0,16	14,4	6,5
с. Варюхино Varyukhino	6,8	3,4	4,6	0,20	15,9	5,8
ПДК по СанПиН 2.1.4.1074-01 MPS by the SanRaN 2.1.4.1074-01	6,0–9,0	7,0	0,3	0,1	10,0	5,0

которые взаимодействуют с гидроксидом железа (III), образуя коллоидные соединения, устойчивые к физико-химическим воздействиям, используемым в процессах водоподготовки.

В таблице представлены концентрации некоторых химических элементов в подземных водах Томской области, значения которых превышают нормативные значения для питьевой воды. Для различных контролируемых источников это значение изменяется от 10,8 до 19,7 мг/л.

Кремний в воде находится преимущественно в виде кремневой кислоты [6], которая поступает в воду в результате гидролиза алюмосиликатных пород по реакциям (1), (2). Углекислота, присут-

ствующая в подземных водах, концентрация которой может достигать значений 150–220 мг/л [7], значительно ускоряет этот процесс.



Ангидрид кремневой кислоты с водой может образовывать различные кислоты типа метакремниевой, ортокремниевой и поликремниевой [8]. Эти кислоты при обычных условиях для природных вод малорастворимы и способны взаимодействовать с соединениями железа и органическими веществами, образуя устойчивые коллоидные соединения [9].

Целью работы является установление последовательности формирования кремнийорганических коллоидных соединений в процессе водоподготовки.

Материалы и методы исследования

Для изучения механизма образования кремнийорганических соединений и получения количественных характеристик наиболее целесообразно проводить исследования на модельных растворах.

Для приготовления модельного раствора, содержащего кремнийорганические вещества, использовали реактивы $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.», дистиллированную воду и органические вещества гумусового происхождения, выделенные из торфяных болот Томской области. Концентрацию органических веществ оценивали по содержанию растворенного органического углерода – DOC (Dissolved Organic Carbon) с помощью анализатора общего органического углерода «Sievers 820». Содержание кремния в растворе определяли фотоколориметрически согласно РД 52.24.433–2005 с помощью прибора КФК-3 и плазменного оптического эмиссионного спектрометра ICP-OES фирмы Varian. Водородный показатель измеряли с использованием многофункционального аппарата WTW Multiline P4.

Распределение частиц по размерам определяли с помощью анализатора Delsa Max Pro (Beckman Coulter), позволяющего измерять размеры частиц в диапазоне 0,4–10000 нм. В анализаторе Delsa Max Pro используются методы фотонной корреляционной спектроскопии и электрофоретического светорассеяния для определения размеров частиц. Значения ζ -потенциала в исследуемых модельных растворах исследовали на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments).

Результаты и их обсуждение

В исследуемых подземных водах концентрация ионов кремния и органических веществ варьируется в широких пределах [10–13]. Это обусловлено геологическим распространением перечисленных компонентов в подземных водах [14]. Кроме ионов кремния и органических веществ подземные воды Западной Сибири обогащены ионами железа, попадающими в воду в результате выщелачивания железистых минералов и пород.

Изучать свойства и механизм образования кремнийорганических веществ на реальной воде сложно ввиду нестабильности состава, поэтому для исследования использовали модельные растворы.

В процессе приготовления модельных растворов было установлено, что на его устойчивость влияет последовательность введения компонентов. Результаты представлены на рис. 1. Концентрация ионов железа, кремния и гумата натрия составляла 5,6, 20, 2,2 мг/л соответственно, pH раствора поддерживали равной 7,5.

На рис. 1 видно, что при последовательном введении в раствор гумата натрия, метасиликата натрия, а затем сульфата железа (II) либо метасиликата натрия, гумата натрия и сульфата железа (II) все ионы железа переходят в коллоидное состояние и раствор устойчив в течение 60 дней. Растворы, приготовленные при иной последовательности введения реагентов, теряют устойчивость в течение 5 суток. Закономерность изменения свойств коллоидного раствора в зависимости от различной последовательности введения компонентов объясняется физико-химическими процессами, протекающими при растворении каждого компонента.

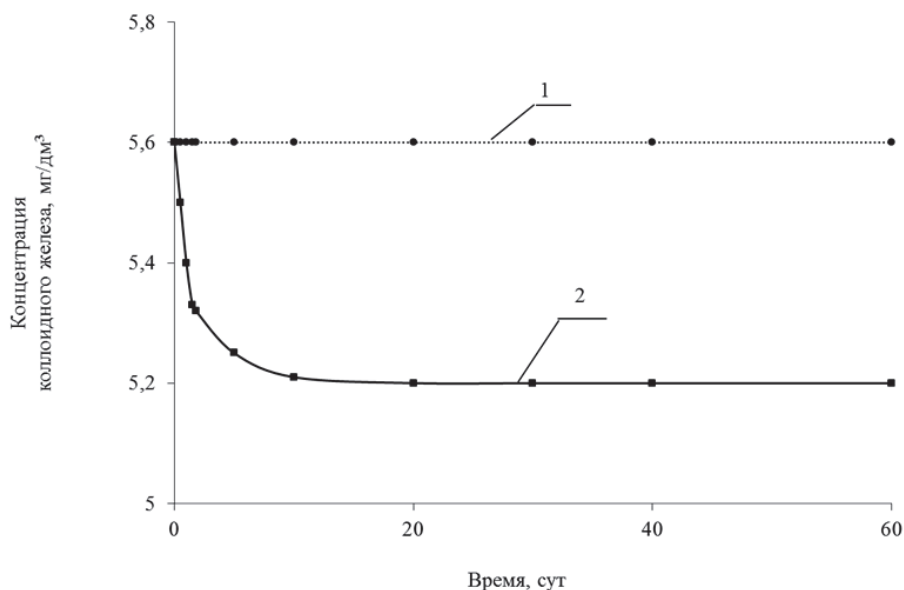


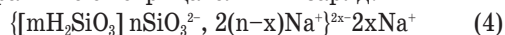
Рис. 1. Влияние последовательности введения компонентов на устойчивость модельного коллоидного раствора: 1 – гумат натрия – метасиликат натрия – сульфат железа (II); 2 – метасиликат натрия – гумат натрия – сульфат железа (II)

Fig. 1. Effect of the sequence of inclusion of the components on stability of the model colloid solution: 1 – sodium humate – sodium metasilicate – iron sulfate (II); 2 – sodium metasilicate – sodium humate – iron sulfate (II)

При растворении метасиликата натрия в воде происходит смещение pH в щелочную среду до значения, равного 10, что связано с протеканием реакции гидролиза согласно уравнению

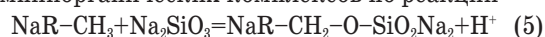


Известно [15], что при гидролизе щелочных метасиликатов возможно образование устойчивых золей кремниевой кислоты, которые в щелочных растворах имеют отрицательный заряд:



Измеренное значение дзета-потенциала составляет -21 мВ.

Также установлено [16], что соединения кремния могут взаимодействовать с гуминовыми веществами. Далее происходит взаимодействие гумата натрия с соединениями кремния с образованием кремнийорганических комплексов по реакции



Образование кремнийорганических комплексов происходит в результате взаимодействия гумата натрия с раствором соли $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, что подтверждено термодинамическими расчетами. Значение энергии Гиббса ($\Delta_r G^\circ$) для реакции (5) составляет $-95,9$ кДж/моль.

Для исследования устойчивости кремнийорганических соединений была рассмотрена такая характеристика, как критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) [17]. Методы определения ККМ, используемые в настоящее время, основаны на изменении физико-химических свойств коллоидных систем в области ККМ [18, 19]. Количественной характеристикой определения ККМ может служить электрохимический потенциал – дзета-потенциал [20]. В качестве исследуемой системы рассматривали раствор, содержащий $5,6$ мг/л ионов железа (III) и $2,2$ мг/л органических веществ, отражающих средние концентрации этих веществ в подземных водах. Определено

значение электрокинетического потенциала при увеличении концентрации ионов кремния от $0,1$ до 20 мг/л. На рис. 2 представлены результаты исследований.

Как показано на рис. 2, резкое изменение дзета-потенциала наблюдается при концентрации кремния от 1 до 3 мг/л. Этот интервал является областью ККМ и определяет содержание ионов кремния, влияющих на образование устойчивой коллоидной системы, состоящей из гидроксида железа (III) и кремнийорганических комплексов. Изменение знака заряда дзета-потенциала свидетельствует о перезарядке коллоида гидроксида железа (III) кремнийорганическими комплексами путем образования на поверхности гидроксида железа (III) защитного слоя, состоящего из кремнийорганических комплексов. Определенное значение дзета-потенциала, равное -45 мВ для коллоидной системы, состоящей из гидроксида железа (III) и кремнийорганических комплексов, свидетельствует об агрегативной устойчивости, так как согласно литературным данным [18] устойчивость коллоидной системы характеризуются значениями дзета-потенциала менее -20 мВ или более $+20$ мВ. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивости гидроксида железа (III) к коагуляции.

Процесс образования кремнийорганических соединений в растворе, продемонстрирован экспериментом по смешению двух растворов, содержащих ионы кремния и гумата натрия, с одновременным определением размеров частиц. В начальный момент, когда протекает процесс диссоциации соли метасиликата натрия, в растворе не наблюдается образование коллоидных частиц во всем исследуемом диапазоне от 1 до 10000 нм. Далее, при добавлении раствора гумата натрия, по истечении 2 минут наблюдается образование частиц с максимумом распределения -50 нм. Результаты представлены на рис. 3.

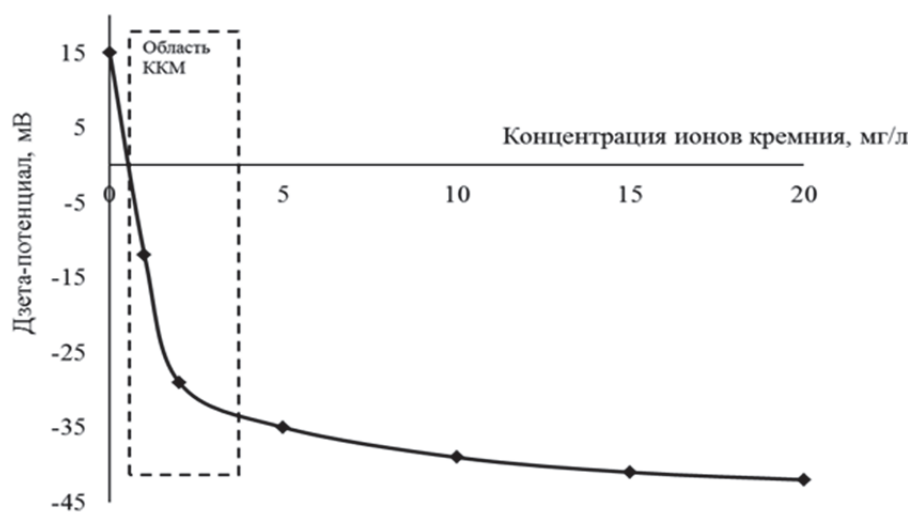


Рис. 2. Изменение дзета-потенциала в зависимости от концентрации кремния в растворе, содержащем $5,6$ мг/л ионов железа и $2,2$ мг/л органических веществ

Fig. 2. Change of the zeta potential depending on the concentration of silicon in a solution which contains $5,6$ mg/l of iron ions and $2,2$ mg/l of organic substances

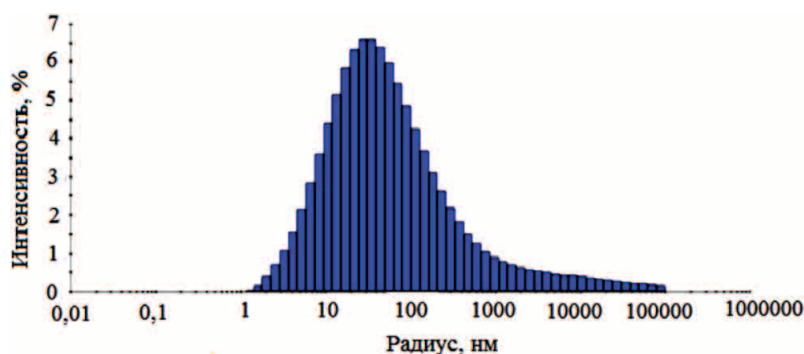


Рис. 3. Кривая распределения частиц по размерам в растворе, содержащем соединения кремния и молекулы гумата натрия, через 2 минуты после смешения

Fig. 3. Curve of particle size distribution in a solution containing silicon compounds and sodium humate molecules after 2 minutes of mixing

При увеличении времени контакта до 2 минут соединений кремния и молекул гумата натрия в растворе происходит укрупнение частиц. На рис. 4 показано смещение максимума распределения частиц в сторону больших размеров.

При увеличении времени контакта частиц до 12 минут максимум распределения смещается в сторону больших размеров и средний размер соответствует 70 нм. Предполагается, что укрупнение частиц происходит за счет образования кремнийорганических соединений вследствие химического взаимодействия и электростатического притяжения. Эксперименты по экстракции кремнийорганических соединений хлороформом показывают, что одновременно снижается концентрация ионов кремния и органических веществ в растворе, что объясняется химическим взаимодействием соединений кремния и органических веществ. Изменение дзета-потенциала свидетельствует об их электростатическом взаимодействии. После 12 минут происходит следующее распределение частиц по размерам: количество частиц в диапазоне 1–100 нм составляет 32 %, а с размером от 100 до 100000 нм – 68 %. Дальнейшее увеличение времени контакта до 30 минут не приводит к смещению максимума, согласно рис. 5, но приводит к увеличению процентного содержания крупных частиц.

Распределение частиц по размерам, представленных на рис. 5, показало, что количество частиц с размерами от 1 до 100 нм составляет 18 %, а от 100 до 100000 нм – около 80 %. После 30 минут укрупнение частиц не наблюдалось, что свидетельствует о наступлении состояния равновесия системы.

Для системы, состоящей из кремнийорганических соединений, было определено значение дзета-потенциала, которое составило –55 мВ. Полученное значение характеризует устойчивость кремнийорганических соединений. Присутствие в растворе ионов железа, особенно в виде нерастворимого гидроксида железа (III), способствует образованию устойчивой коллоидной системы. Кремнийорганические соединения образуют на поверхности нерастворимого гидроксида железа (III) защитный слой, что препятствует протеканию коагуляционных процессов. Это было подтверждено экспериментами по экстракции органических веществ хлороформом по методике [21]. При экстракции органических веществ одновременно снижается концентрация ионов кремния и железа в растворе, что свидетельствует о связи кремнийорганических соединений с гидроксидом железа (III). Последовательность взаимодействия ионов кремния с гуминовыми веществами, а затем с малорастворимым

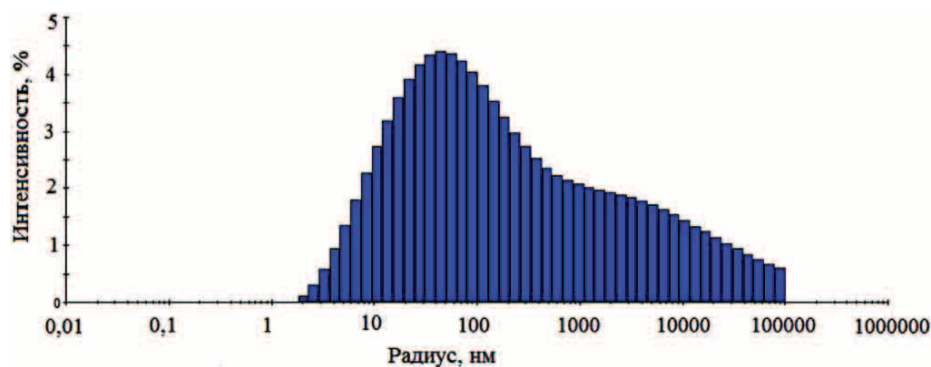


Рис. 4. Кривая распределения частиц по размерам в растворе, содержащем соединения кремния и молекулы гумата натрия, через 12 минут

Fig. 4. Curve of particle size distribution in a solution containing silicon compounds and sodium humate molecules after 12 minutes

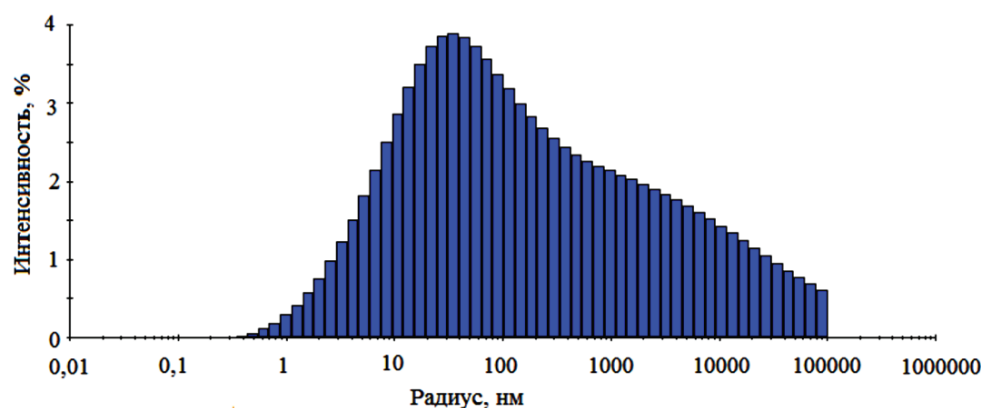


Рис. 5. Кривая распределения частиц по размерам в растворе, содержащем соединения кремния и молекулы гумата натрия, через 30 минут

Fig. 5. Curve of particle size distribution in a solution containing silicon compounds and sodium humate molecules after 30 minutes

гидроксидом железа, установленная в процессе приготовления модельных растворов, вероятно, реализуется и в процессах водоподготовки, что необходимо учитывать при выборе технологических схем получения чистой питьевой воды.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена последовательность формирования устойчивой коллоидной системы, состоящей из кремнийорганических веществ: гидролиз метасиликатов с образованием золя кремниевой кислоты и взаимо-

действие с гуминовыми веществами с образованием кремнийорганических соединений. Рассчитано значение энергии Гиббса ($\Delta_r G^\circ$) для второй стадии ($-95,9$ кДж/моль). Определены дзета-потенциал частиц коллоидного размера (-55 мВ) и размер частиц, максимум распределения которых составляет 70 нм. Показано, что неспособность к коагуляции гидроксида железа (III) в процессе аэрации подземных вод обусловлена образованием на его поверхности кремнийорганических соединений.

Работа выполнена по теме 7.1504.2015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов Р.В. Технология обескремнивания природных вод фильтрованием через модифицированную загрузку: дис. ... канд. тех. наук. – Новочеркасск, 2013. – 136 с.
2. Aitken G.R., Hsu-Kim H., Ryan J.N. Influence of dissolved organic matter on the environmental fate of metals, nanoparticles, and colloids // *Environ. Sci. Technology*. – 2011. – P. 3196–3201.
3. Сомов М.А. Водоснабжение. – М: Инфра-М, 2007. – 287 с.
4. СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 103 с.
5. Мачехина К.И., Шиян Л.Н., Тропина Е.А. Устойчивость коллоидов железа в природных водах // *Журнал прикладной химии*. – 2012. – Т. 85. – № 7. – С. 1182–1185.
6. Рябчиков Б.Е. Современная водоподготовка. – М.: ДеЛи плюс, 2013. – 680 с.
7. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 671 с.
8. Шварцев С.Л. Общая гидрогеохимия – М.: Альянс, 2012. – 601 с.
9. Мачехина К.И. Процесс очистки подземных вод от коллоидных соединений железа и его аппаратное оформление: дис. ... канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 121 с.
10. Цветность подземных вод Западно-Сибирского региона / Л.В. Сериков, Л.Н. Шиян, Е.А. Тропина, П.А. Хряпов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 3. – С. 54–58.
11. Войно Д.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И. Комплексный подход получения питьевой воды из подземных источников Западной Сибири // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2015. – Т. 58. – № 3. – С. 82–86.
12. Тропина Е.А. Аппаратурно-технологическая система получения питьевой воды из подземных источников Западно-Сибирского региона: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Томск, 2007. – 20 с.
13. Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia / L.V. Serikov, E.A. Tropina, L.N. Shiyann, F.H. Frimmel, G. Metreveli, M. Delay // *Journal for Soils and Sediments*. – 2009. – № 2. – P. 103–110.
14. Видяйкина Н.В. Обеспечение экологической безопасности при использовании сельским населением подземных вод для питьевых целей на примере Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа: дис. ... канд. геолого-мин. наук. – Томск, 2010. – 153 с.
15. Colloid and surface chemistry / E.D. Shchukin, A.V. Pertsov, E.A. Amelina, A.S. Zelenov. – Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2001. – 734 p.
16. Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation / I.V. Perminova, F.H. Frimmel, A.V. Kudryavtsev, N.A. Kulikova, G. Abbt-Braun, S. Hesse, V.S. Petrosyan // *Environ. Sci. Technol.* – 2003. – № 37. – P. 2477–2485.
17. Белик В.В. Физическая и коллоидная химия. – М.: Академия, 2005. – 287 с.
18. Жуков Б.Д. Коллоидная химия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 384 с.
19. Сумм Б.Д. Коллоидная химия. – М.: Академия, 2013. – 240 с.
20. Щукин Е.Д. Коллоидная химия. – М.: Юрайт, 2013. – 444 с.
21. Способ определения железа в воде: пат. Рос. Федерация № 2216019; заявл. 06.08.2002; опубл. 10.11.2003, Бюл. № 31. – 3 с.

Поступила 27.11.2015 г.

UDC 542.06; 544.77, 537.52

FORMATION OF ORGANOSILICON COMPOUNDS IN WATER PURIFICATION PROCESSES

Larisa A. Kostikova,

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

Lyudmila N. Shiyan,

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

Ksenia I. Machekhina,

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

Nikolay B. Egorov,

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

The study of the problem of removal of silicon ions of groundwater in water treatment processes and the ability of silicon ions to participate in the formation of silicon compounds that are resistant to physical and chemical effects is an urgent task, has practical significance for purification technologies developers.

The aim of the research is the study of the formation mechanism of colloid organosilicon compounds in the water treatment process.

Methods: photocolorimetry, pH measurement, titrometry, optical methods.

Results. The authors investigated that the silicon ions have effect on the formation of colloidal organosilicon compounds of iron compounds whose presence in the groundwater reduces the performance of water treatment plants. It is shown that the silicon ions react with the organic substances of the humus origin to form stable colloidal compounds. The authors also defined the molar ratio of silicon ions and humic substances (critical micelle concentration) at which colloidal compounds are formed. The resulting molar ratio of silicon ions and humic substances is 7:2 respectively. We proposed a scheme for the formation of the sol and silicon compounds and defined the zeta potential which is -21 mV. We also demonstrated the formation of organosilicon compounds in the solution by mixing 2 solutions containing silicon ions and sodium humate with simultaneous determination of particle size. The maximum particle distribution changes within 30 minutes in the range of 50 to 70 nm during the formation of the organosilicon colloidal compounds. At the same time there is a coarsening of the particles, the percentage of particles with sizes ranging from 100 to 100,000 nm varies from 68 to 80 %.

Key words:

Silicon compounds, particle size, organosilicon compounds, natural water, water purification.

The subject of the research is 7.1504.2015.

REFERENCES

1. Fedotov R.V. *Tekhnologiya obeskretnivaniya prirodnnykh vod filtriruyemykh cherez modifitsirovannuyu zagruzku*. Dis. Kand. nauk [Technology of desilication of natural water by means of filtration through a modified charge. Cand. Diss.]. Novocherkassk, 2013. 136 p.
2. Aitken G.R., Hsu-Kim H., Ryan J.N. Influence of dissolved organic matter on the environmental fate of metals, nanoparticles, and colloids. *Environ. Science Technology*, 2011, no. 45 (8), pp. 3196–3201.
3. Somov M.A. *Vodosnabzhenie* [Water supply]. Moscow, Infra-M Publ., 2007. 287 p.
4. SanPiN 2.1.4.1074–01. *Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized water supply systems. Quality control. The sanitary and epidemiological rules and norms]. Moscow, Federal Centre for Sanitary Inspection Ministry of Health of Russia Publ., 2002. 103 p.
5. Machekhina K.I., Shiyan L.N., Tropina E.A. Ustoychivost kolloidov zheleza v prirodnnykh vodakh [Stability of iron colloids in natural waters]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 7, pp. 1182–1185.
6. Ryabchikov B.E. *Sovremennaya vodopodgotovka* [Modern water treatment]. Moscow, DeLi Plus Publ., 2013. 680 p.
7. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 671 p.
8. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeokhimiya* [General hydrogeochemistry]. Moscow, Alyans Publ., 2012. 601 p.
9. Machekhina K.I. *Protseess ochistki podzemnykh vod ot kolloidnykh soedineniy zheleza i ego apparaturnoe oformlenie*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Groundwater purification from iron colloidal substances and its hardware design. Author's abstract Cand. Diss.]. Tomsk, 2013. 121 p.
10. Serikov L.V., Shiyan L.N., Tropina E.A., Khryapov P.A. Tsvetnost podzemnykh vod Zapadno-Sibirskogo regiona [Color of groundwater of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 3, pp. 54–58.
11. Voyno D.A., Shiyan L.N., Machekhina K.I. Kompleksnyy podkhod polucheniya pitevoy vody iz podzemnykh istochnikov Zapadnoy Sibiri [Integrated approach to obtaining drinking water from underground sources of Western Siberia]. *News of Higher*

- Schools. Chemistry and Chemical Engineering*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 82–86.
12. Tropina E.A. *Apparaturno-tehnologicheskaya sistema polucheniya pitevoy vody iz podzemnykh istochnikov Zapadno-Sibirskogo regiona*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Hardware and technological scheme of production of drinking water from underground sources of West Siberian region. Author's abstract Cand. Diss.]. Tomsk, 2007. 20 p.
13. Serikov L.V., Tropina E.A., Shiyan L.N., Frimmel F.H., Metreveli G., Delay M. Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia. *Journal for Soils and Sediments*, 2009, no. 2, pp. 103–110.
14. Vidyaykina N.V. *Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti pri ispolzovanii selskim naseleniem podzemnykh vod dlya pitevykh tsel'ey na primere Tomskoy oblasti i Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga*. Dis. Kand. nauk [Ensuring environmental safety in the use of the rural population of groundwater for drinking purposes by the example of the Tomsk region and the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Cand. Diss.]. Tomsk, 2010. 153 p.
15. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A., Zelenev A.S. *Colloid and surface chemistry*. Amsterdam, Elsevier Science B.V. Publ., 2001. 734 p.
16. Perminova I.V., Frimmel F.H., Kudryavtsev A.V., Kulikova N.A., Abbt-Braun G., Hesse S., Petrosyan V.S. Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, no. 37, pp. 2477–2485.
17. Belik V.V. *Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya* [Physical and colloid chemistry]. Moscow, Academy Publ., 2005. 287 p.
18. Zhukov B.D. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Novosibirsk, NSTU Press, 2006. 384 p.
19. Summ B.D. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Moscow, Academy Publ., 2013. 240 p.
20. Shchukin E.D. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Moscow, Urayt Publ., 2013. 444 p.
21. Serikov L.V., Shiyan L.N., Tropina E.A. *Sposob opredeleniya zheleza v vode* [A method for determination of iron in water]. Patent RF, no. 2216019, 2003.

Received: 27 November 2015.

УДК 621.313.333

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕСИММЕТРИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ИНДУКЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Лавренов Евгений Олегович,

аспирант кафедры электромеханики Новосибирского государственного
технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск,
пр. К. Маркса, 20. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru

При эксплуатации электрических машин часто имеют место ненормальные и аварийные режимы работы. Существующая на сегодняшний день защита электрических машин от аварийных режимов в большинстве случаев способна лишь экстренно отключить двигатель в случае превышения фазными токами допустимого уровня. Однако в некоторых отраслях (металлургия, химическая промышленность) с непрерывным циклом производства это может оказаться крайне нежелательным по экономическим причинам или причинам, связанным с вопросами безопасности. Поэтому задачи исследования, прогнозирования и совершенствования методов диагностики подобных режимов не перестают быть актуальными.

Цель работы: поиск наиболее эффективного и рационального метода компенсации влияния электрической несимметрии цепи асинхронного двигателя на величину провала в статической механической характеристике машины.

Методы исследования: численное моделирование с использованием программного пакета MATLAB, метод Рунге–Кутты для решения системы дифференциальных уравнений высших порядков, составленных согласно законам Кирхгофа, Ленца, Ампера и второму закону Ньютона.

Результаты. Показано, что для компенсации провала в статической механической характеристике асинхронного двигателя пригодны методы, приводящие к ослаблению влияния ЭДС обратной последовательности в статоре. Выполнено имитационное моделирование индукционного двигателя в математическом пакете MATLAB с целью поиска наиболее удобного и простого алгоритма компенсации влияния несимметрии на механический момент асинхронной машины. Рассмотрены следующие варианты: введение в цепь статора противоЭДС с амплитудой, частотой и фазой, минимизирующими токи обратной последовательности; повышение сопротивления статора путем введения внешних реостатов; использование источника тока для питания индукционного двигателя. По полученным результатам сделаны выводы.

Ключевые слова:

Имитационное моделирование, индукционный двигатель, несимметричный режим, электрическая несимметрия, статическая механическая характеристика, магнитная индукция.

Введение

Благодаря простоте конструкции, высокой надежности и относительно невысокой стоимости асинхронный двигатель (АД) является наиболее распространенным электродвигателем. АД, как правило, рассчитаны на срок службы 15–20 лет без капитального ремонта при условии правильной эксплуатации. Но в действительности случаются отступления от номинальных режимов эксплуатации или производственный брак АД, из-за чего возникают аварийные режимы [1–4]. Одним из таких случаев является возникновение электрической несимметрии цепи ротора, сопровождающейся значительным повышением фазных токов и, как следствие, нагревом обмоток статора, усилением механической вибрации и появлением провала в механической характеристике двигателя. Несимметричный режим в цепи ротора опаснее несимметрии статорной цепи тем, что при пуске двигателя может «застрять» на скорости около 0,5 от синхронной, т. е. имеет место так называемый эффект Гергеса [5–9].

Для поиска решений по минимизации влияния эффекта Гергеса на АД при наличии электрической несимметрии применен аналитический способ имитационного моделирования, который основан на решении систем дифференциальных уравнений. Он также позволяет спрогнозировать поведение модели в конкретной ситуации для настройки системы автоматики.

Эллиптический, или пульсирующий, магнитный поток асимметричного ротора представляется векторной суммой токов прямой и обратной последовательности, вращающихся относительно ротора в противоположных направлениях с равными по модулю скоростями:

$$\omega_1 = -\omega_2 = \omega - \omega_R, \quad (1)$$

где ω_1 – скорость магнитного поля ротора прямой последовательности; ω_2 – скорость магнитного поля ротора обратной последовательности; ω – скорость магнитного поля статора; ω_R – скорость вращения ротора относительно статора.

Магнитный поток обратной последовательности в роторе относительно статора вращается со скоростью

$$\omega_{R-S} = \omega_R - \omega_2 = 2\omega_R - \omega \quad (2)$$

и, согласно закону Фарадея, индуцирует в цепи статора ЭДС, которая, в свою очередь, порождает ток обратной последовательности статора, встречно направленный по отношению к основному току статора и отличающийся от него частотой. Электромагнитный момент, порождаемый этим током, в свою очередь, действует встречно моменту, создаваемому основным магнитным полем. Как видно из (2), паразитный магнитный поток имеет нулевую скорость относительно статора при скорости вращения ротора, равной половине синхронной [10–19].

Таким образом, источником провала в механической характеристике АД при несимметрии в цепи ротора выступает паразитный асинхронный момент, возникающий при воздействии магнитного потока обратной последовательности в роторе на цепь статора.

Для минимизации этого паразитного момента необходимо ослабление силы тока обратной последовательности в роторе или статоре. Поскольку регулирование электромагнитных параметров ротора – довольно сложная задача, к тому же требующая конструктивной доработки ряда узлов электрической машины, то предпочтительнее осуществлять компенсацию провала механической характеристики со стороны статорной цепи.

Согласно закону Ома, минимизация тока обратной последовательности в статоре возможна введением встречной ЭДС в цепь статора для компенсации вышеуказанной индуцированной ЭДС обратной последовательности либо увеличением сопротивления цепи.

Таким образом, можно выделить следующие методы ослабления паразитного асинхронного момента: введение противоЭДС в цепь статора, использование трехфазного источника тока для принудительного задания тока фаз статора, введение сопротивлений в цепь статора, использование конденсаторов и резонансных контуров. Последний метод требует индивидуального расчета величин емкостей конденсаторов для каждого двигателя, во избежание резонанса напряжений на основной частоте и рассмотрен не будет.

Введение противоЭДС в цепь статора

Математическая модель статора АД с соединением обмоток по схеме «звезда» без нейтрального провода для исследования влияния противоЭДС и дополнительного сопротивления в цепи статора может быть представлена системой уравнений [20–23]:

$$\begin{cases} u_A - i_{sa} R_{sa} - \frac{d\psi_{sa}}{dt} - u_B + i_{sb} R_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} = 0; \\ u_B - i_{sb} R_{sb} - \frac{d\psi_{sb}}{dt} - u_C + i_{sc} R_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} = 0; \\ i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При этом потокосцепление фазы А статора связано со всеми токами асинхронной машины следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \psi_{sa} = (L_{1s} + L_m) i_{sa} - \frac{1}{2} L_m i_{sb} - \\ - \frac{1}{2} L_m i_{sc} + L_m i_{ra} \cos(\varphi + 0) + \\ + L_m i_{rb} \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_{rc} \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где L_m – взаимная индуктивность обмотки; L_{1s} – индуктивность рассеяния обмотки статора; i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} –

токи статора в фазах А, В и С соответственно; i_{ra} , i_{rb} , i_{rc} – токи ротора в фазах А, В и С соответственно; φ – угол положения обмотки фазы ротора и соответствующей одноименной обмотки фазы статора.

Аналогичные уравнения потокосцеплений статора могут быть получены для фаз В и С.

Система уравнений электромагнитных процессов ротора имеет вид

$$\begin{cases} -i_{ra} R_{ra} - \frac{d\psi_{ra}}{dt} + i_{rb} R_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} = 0; \\ -i_{rb} R_{rb} - \frac{d\psi_{rb}}{dt} + i_{rc} R_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} = 0; \\ i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Потокосцепление фазы А ротора связано со всеми токами асинхронной машины следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \psi_{ra} = (L_{2s} + L_m) i_{ra} - \frac{1}{2} L_m i_{rb} - \\ - \frac{1}{2} L_m i_{rc} + L_m i_{sa} \cos(-\varphi + 0) + \\ + L_m i_{sb} \cos\left(-\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) + L_m i_{sc} \cos\left(-\varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

где L_{2s} – индуктивность рассеяния обмотки ротора.

Аналогичные уравнения потокосцеплений ротора могут быть получены также для фаз В и С.

Для проведения численного моделирования требуются также уравнения механического движения:

$$\begin{cases} M = -L_m p \sum_{n=A,B,C} i_{sn} \sum_{k=A,B,C} i_{rk} \sin \alpha_{nk}, \\ \varphi = \int_0^t \omega_R dt, \end{cases} \quad (7)$$

где M – вращающий момент на валу двигателя; ω_R – угловая частота вращения ротора; p – число пар полюсов; α_{nk} – угол поворота фазы ротора относительно фазы статора; i_{sn} и i_{rk} – токи фаз статора и ротора.

Моделирование несимметрии в цепи ротора в данном и последующих случаях выполняется в режиме обрыва фазы ротора, для этого в системе уравнений (5) величину активного сопротивления одной из фаз ротора необходимо увеличить на несколько порядков по сравнению с ее номинальным значением.

На рис. 1 приведен вариант блок-схемы устройства для практической реализации компенсации провала момента при наличии несимметрии ротора путем введения противоЭДС в цепь статора.

С задающего генератора (ЗГ) фазных напряжений поступают управляющие напряжения на сумматоры, которые суммируют взятые с обратным знаком напряжения обратной связи и противоЭДС обратной последовательности. ПротивоЭДС вычисляется как произведение тока обратной последовательности на входное полное сопротивление АД при частоте $(\omega - 2\omega_r)/\omega$.

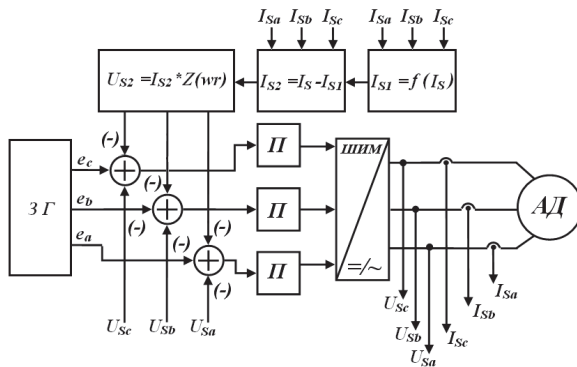


Рис. 1. Блок-схема устройства компенсации провала момента при наличии несимметрии ротора путем введения противоЭДС в цепь статора

Fig. 1. Device block scheme for torque dip compensation in case of rotor asymmetry by the way of back EMF insertion in stator circuit

Ток статора фазы А прямой последовательности может быть найден как

$$I_{S1a} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(I_{Sa} \sin(\omega t) + I_{Sb} \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{Sc} \sin(\omega t + 2\pi/3) \right) dt. \quad (8)$$

Токи прямой последовательности фаз В и С могут быть найдены аналогично путем изменения фазы на $\pm 120^\circ$.

То есть ток статора обратной последовательности вычисляется как ток статора за вычетом тока прямой последовательности. Такой способ расчета выбран исходя из того, что при заторможенном роторе частота тока обратной последовательности совпадает с частотой тока прямой последовательности и интегрирование обратной последовательности окажется ошибочным.

Для определения полного входного сопротивления необходимо знать величины соотношений активных сопротивлений и индуктивностей конкретного двигателя, которые при наличии несимметрии будут отличаться от номинальных значений. В том случае, если их практическое определение встречает определенные трудности, целесообразно использовать некоторые допущения. Например, полное входное сопротивление может быть найдено по закону Ома:

$$\underline{Z}(\omega r) = \frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_{S1}} \frac{\omega - 2\omega r}{\omega}. \quad (9)$$

Так как зависимость активной и реактивной составляющих полного входного сопротивления от частоты не может быть универсально подобрана по схеме замещения для всех классов АД, то принято равномерное их изменение от относительной частоты тока обратной последовательности в статоре (9).

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Наибольшую неравномерность характеристика $M''(s)$ имеет, как видно, в области скольжения $-0,5$, где противоЭДС недостаточно точно отражает ЭДС, наводимую потоком ротора обратной последовательности;

$|U_2|$ на данном графике представляет модуль вычисленной противоЭДС, подаваемой в цепь статора.

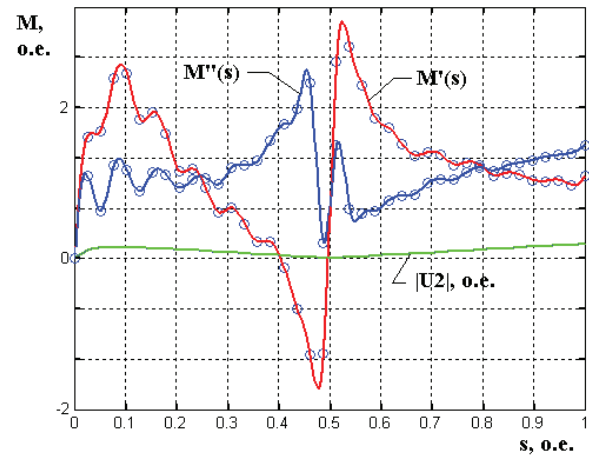


Рис. 2. Статическая механическая характеристика АД без компенсации токов обратной последовательности статора (M') и с компенсацией (M'')

Fig. 2. Induction motor static mechanical characteristic without stator negative sequence current compensation (M') and with compensation (M'')

Как видно из результатов расчета, неточность в вычислении полного входного сопротивления при частоте, отличной от промышленной, приводит к неравномерности графика момента и снижению максимального момента при величинах скольжения меньших критического.

Введение активных сопротивлений в цепь статора

Самым слабым местом этого метода компенсации является очень низкий КПД из-за выделения большой активной мощности на реостатах. Идея метода заключается в увеличении активного сопротивления статорной цепи с целью ослабления тока обратной последовательности в статоре, наводимого несимметричным магнитным потоком ротора. Величина механического момента компенсируется увеличением напряжения питания. Таким образом, требуемый уровень напряжения источника питания может превышать на несколько порядков номинальное напряжение питания АД, что делает применение этого метода не рациональным.

Замена активных сопротивлений дросселями в цепи статора также не рекомендуется, т. к. при скольжении равном 0,5, когда наблюдается эффект Гергеса, частота тока обратной последовательности близка к нулю и дроссели не будут создавать требуемого сопротивления для статорной цепи тока.

На рис. 3 приводятся механические характеристики в предельном случае несимметрии ротора (когда амплитуды токов прямой и обратной последовательности в роторе равны) для обычного режима ($R_s' = 0,015$) и с дополнительными активными сопротивлениями в цепи статора ($R_s' = 15$). Как видно, в последнем случае «застывание», обусловленное эффектом Гергеса, отсутствует.

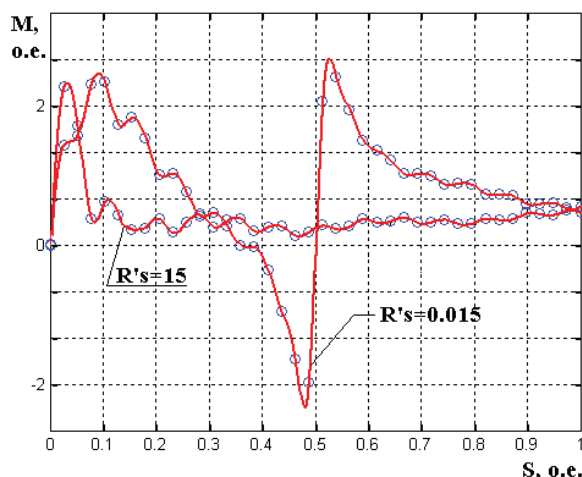


Рис. 3. Статическая механическая характеристика АД без добавочных активных сопротивлений в цепи статора ($R'_s=0,015$) и с активными сопротивлениями ($R'_s=15$)

Fig. 3. Induction motor static mechanical characteristic without additional resistance in stator circuit ($R'_s=0,015$) and with additional resistance ($R'_s=15$)

Использование трехфазного источника тока

Так как статорные токи при этом методе задаются источником тока принудительно, то уравнения, составленные по законам Кирхгофа для цепи статора, из исходной системы исключаются. Математическая модель ротора АД с соединением обмоток по схеме «звезда» без нейтрального провода после преобразований (5)–(7) примет вид системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dt} i_{ra} \\ \frac{d}{dt} i_{rb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2L_{2s} - \frac{3}{2}L_m & L_{2s} + \frac{3}{2}L_m \\ -L_{2s} - \frac{3}{2}L_m & -2L_{2s} - \frac{3}{2}L_m \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} U_{RA} \\ U_{RB} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_{RA} = & -i_{ra}R_{ra} + i_{rb}R_{rb} + \\ & + I_{sa} \left(\omega L_m \left(3\cos\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \right) \cos(\omega t - \alpha_a) + \right. \\ & \left. + \omega r L_m \left(-3\sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \right) \sin(\omega t - \alpha_a) \right) + \\ & + I_{sb} \left(\omega L_m \left(-3\cos\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \right) \cos(\omega t - \alpha_b) + \right. \\ & \left. + \omega r L_m \left(3\sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \right) \sin(\omega t - \alpha_b) \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{RB} = & -i_{ra}R_{rc} - i_{rb}(R_{rb} + R_{rc}) + \\ & + I_{sa} \left(\omega L_m \left(3\cos\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \right) \cos(\omega t - \alpha_a) + \right. \\ & \left. + \omega r L_m \left(-3\sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \right) \sin(\omega t - \alpha_a) \right) + \\ & + I_{sb} \left(\omega L_m (-3\cos(\varphi)) \cos(\omega t - \alpha_b) + \right. \\ & \left. + \omega r L_m (3\sin(\varphi)) \sin(\omega t - \alpha_b) \right), \end{aligned}$$

где I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} – токи, задаваемые трехфазным источником.

На рис. 4 приведен вариант блок-схемы устройства для практической реализации компенсации провала момента при наличии несимметрии ротора с использованием источников тока.

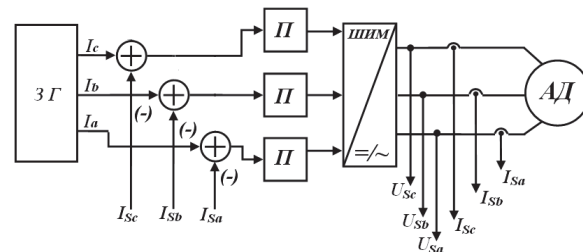


Рис. 4. Блок-схема устройства компенсации провала момента при несимметрии ротора с использованием источника тока

Fig. 4. Device block scheme using current power supply for torque dip compensation in case of rotor asymmetry

С задающего генератора (ЗГ) фазных токов поступают управляющие токи на сумматоры, где они складываются с токами обратной связи, взятыми с обратным знаком. Так, задавая, главным образом, закон изменения токов в фазах статора, можно достаточно качественно корректировать статическую механическую характеристику.

На рис. 5 изображено семейство статических механических характеристик, построенных с учетом компенсации провала момента с использованием источника тока для различных уровней несимметрии ротора в диапазоне от симметричного режима ($R'2'a=0,018$ о. е.) до предельного случая несимметрии – обрыва фазы ротора ($R'2'a=18$ о. е.).

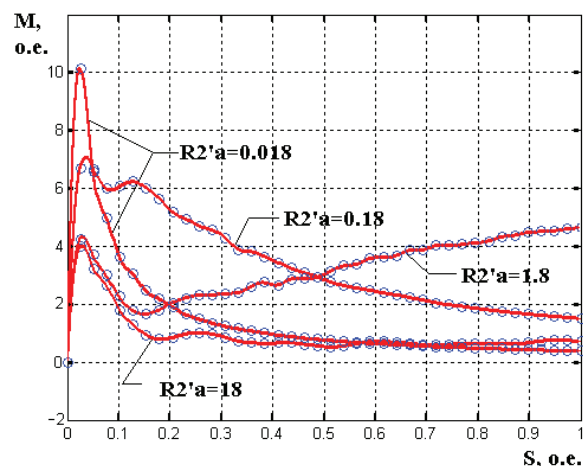


Рис. 5. Статические механические характеристики при компенсации эффекта несимметрии ротора питанием цепи статора от источника тока

Fig. 5. Static mechanical characteristic with accounting rotor asymmetry effect influence compensation by current power supply of stator circuit

Токи статора при всех значениях сопротивления фазы ротора на всем диапазоне скольжений поддерживаются на номинальном уровне. Большее значение критического момента в симметрич-

ном режиме (рис. 5) обусловлено наличием большего, по сравнению с несимметричными режимами, значения напряжения на статорных обмотках при фиксированной величине фазных токов, поскольку напряжение на фазах статора при питании АД от источника тока определяется эквивалентным полным сопротивлением двигателя при вращении его ротора с заданной скоростью. В симметричном режиме ротора значение полного сопротивления больше.

Выводы

1. Показано, что для компенсации провала в статической механической характеристике АД пригодны методы, приводящие к ослаблению влияния ЭДС обратной последовательности в статоре, индуцируемой несимметричным магнитным потоком ротора, на суммарный ток статора.
2. Выявлено, что при использовании противоЭДС для точной компенсации электрической несимметрии ротора нужно располагать значениями активных сопротивлений и индуктивностей конкретного АД, что создает неудобства прак-

тического применения этого метода. Следствием использования приблизительной зависимости между частотой и входным сопротивлением является рост погрешности конечных результатов.

3. Исследовано влияние введения активных сопротивлений в цепь статора на статическую механическую характеристику, в ходе чего обнаружена нецелесообразность применения этого метода по причине очень низкого КПД системы в целом и требующегося напряжения источника питания, многократно превышающего номинальное значение напряжения питания АД.
4. Показано, что использование источника тока для питания АД с электрической несимметрией ротора не требует знания параметров схемы замещения двигателя и обеспечивает приемлемую статическую механическую характеристику. Невысокий механический момент, развиваемый АД при высоком скольжении, может быть увеличен кратковременным повышением статорного тока, что допустимо, так как режим разгона и торможения АД, как правило, не является затяжным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. Математическое моделирование асинхронных машин. – М.: Энергия, 1969. – 327 с.
2. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. – М.: Колос, 1979. – 112 с.
3. Лавренев Е.О. Способы учета насыщения магнитопровода в имитационном моделировании асинхронного двигателя с использованием численных методов // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2014. – № 2. – С. 58–63.
4. Ковач К.П., Рап И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Жуловян В.В. Основы электромеханического преобразования энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 425 с.
6. Гирник А.С., Рапопорт О.Л. Математическое моделирование работы трехфазных вспомогательных электрических машин на электровозе ЭС5К в условиях асимметричного питания // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 69–73.
7. Ешин Е.К. Моделирование несимметрии трехфазного асинхронного электродвигателя в MATLAB SIMULINK // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 5. – С. 81–90.
8. Глазырина Т.А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2012. – 18 с.
9. Уайт Д.С., Вудсон Г.Х. Электромеханическое преобразование энергии / пер. с англ. М.; Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
10. Tavner P., Ran L., Penman J. Condition monitoring of rotating electrical machines. – London: The institution of engineering and technology, 2008. – 282 p.
11. Thompson W.T., Gilmore R.J. Motor current signature analysis to detect fault in induction motor drive – fundamentals, data interpretation and industrial case histories // Proceeding of the thirty-second turbomachinery symposium. – Texas, USA, 2003. – P. 145–153.
12. Vaimann T., Kallaste A. Detection of broken rotor bars in three-phase squirrel-cage induction motor using fast Fourier transform // 10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering». – Pärnu, Estonia, 2011. – P. 52–56.
13. Kostic M., Nikolic A. Negative consequence of motor voltage asymmetry and its influence to the inefficient energy usage // WSEAS transactions on circuits and systems. – 2010. – Iss. 8. – V. 9. – P. 547–556.
14. Simulation and fault detection of three-phase induction motors / B. Liang, B. Payne, A. Ball, S. Iwnicki // Mathematics and Computers in Simulation. – 2002. – № 61. – P. 1–15.
15. Адаменко А.И. Методы исследования несимметричных асинхронных машин. – Киев: Наук. Думка, 1969. – 356 с.
16. Соркин М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32> (дата обращения: 02.11.2015).
17. Куличенков В.П. Влияние несимметрии напряжений на потери электроэнергии // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 9 (78). URL: http://www.energetika.by/arch/-year_m21=2009-page_m21=2 (дата обращения: 02.11.2015).
18. Никитин Н.Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: монография. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 334 с.
19. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 31. – С. 50–52.
20. Лавренев Е.О. Имитационная модель асинхронной машины с учетом электрической несимметрии и насыщения магнитной цепи // Журнал «ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность». – 2015. – № 3. – С. 25–30.
21. Лавренев Е.О. Математическая модель для исследования режимов работы асинхронного двигателя с фазным ротором при несимметрии в цепи ротора // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации – 2012». – Новосибирск, 2012. – С. 304–305.
22. Тонн Д.А. Анализ аналитических методов, применяемых для расчета несимметричных асинхронных машин // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 1. – С. 74–76.
23. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс. – СПб.: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

Поступила 14.11.2015 г.

UDC 621.313.333

COMPENSATION METHODS OF ELECTRICAL ASYMMETRY EFFECT ON INDUCTION MOTOR MOMENT

Evgeniy O. Lavrenov,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: e.lavrenov@inbox.ru

Irregular and emergency modes occur frequently during electric motors operation. Nowadays, the existing electrical machines protection is only capable to immediately switch off the motor in case of the current level increase. However, in metallurgy, chemical industry it can be unacceptable due to economic and safety reasons. Thus, the problems of research, forecast and diagnostic method improvement of those modes are still urgent.

The main aim of study: finding the most effective and efficient compensation method of induction motor circuits electrical asymmetry effect on the motor static mechanical characteristic dip magnitude.

The methods used in the study: numerical modeling using MATLAB package, Runge–Kutta method for solving the system of higher order differential equations composed by the laws of Kirchhoff, Lenz, Ampere and Newton's second law of motion.

The results. It is shown that methods leading to weakening of stator negative sequence back emf are usable for torque dip compensation in static mechanical characteristic. Induction motor modeling using MATLAB package to find the simplest compensation algorithm of the asymmetry effect on the motor moment was conducted. The following ways were reviewed: insertion of back emf in stator circuit with such magnitude, frequency and electrical angle that minimized stator negative-sequence current; rising stator impedance by external resistance insertion; current power supply using for induction motor power. Conclusions based on results were made.

Key words:

Modeling, induction motor, asymmetry mode, electrical asymmetry, static mechanical characteristic, magnetic induction.

REFERENCES

1. Kopylov I.P., Mamedov F.A., Bepalov V.Ya. *Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnykh mashin* [Mathematical modeling of induction motors]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 327 p.
2. Musin A.M. *Avariynye rezhimy asinkhronnykh elektrodvigatelay i sposoby ikh zashchity* [Induction motor emergency modes and ways of its protection]. Moscow, Kolos Publ., 1979. 112 p.
3. Lavrenov E.O. Sposoby ucheta nasyscheniya magnitoprovoda v imitatsionnom modelirovanii asinkhronnogo dvigatelya s ispolzovaniem chislennykh metodov [Ways of accounting core saturation at induction motor modeling by numerical methods]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 2014, no. 2, pp. 58–63.
4. Kovach K.P., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peregmennoy toka* [Transient processes of AC motors]. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 744 p.
5. Zhulovyan V.V. *Osnovy elektromekhanicheskogo preobrazovaniya energii* [Fundamental of electromechanical energy conversion]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2014. 425 p.
6. Girnik A.S., Rapoport O.L. Matematicheskoe modelirovanie raboty trekhfaznykh vspomogatelnykh elektricheskikh mashin na elektrovoze 2ES5K v usloviyakh asimmetrichnogo pitaniya [Performance of three-phase 2ES5K electromotive pony motor with asymmetry supply conditions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 69–73.
7. Eshchin E.K. Modelirovanie nesimmetrii trekhfaznogo asinkhronnogo elektrodvigatelya v MATLAB SIMULINK [3-phase induction motor asymmetry modeling using MATLAB SIMULINK]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 5, pp. 81–90.
8. Glazyrina T.A. *Sovershenstvovanie metodov diagnostiki asinkhronnykh dvigateley na osnove analiza potrebyaemykh tokov*. Avtoref. Dis. Kand. nauk [Improvement of induction motor diagnostics methods based on input current analysis. Author's abstract Diss. Cand.]. Tomsk, 2012. 18 p.
9. Uayt D.S., Vudson G.Kh. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical energy conversation]. Trans. from English. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1964. 528 p.
10. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. *Condition monitoring of rotating electrical machines*. London, The institution of engineering and technology, 2008. 282 p.
11. Thompson W.T., Gilmore R.J. Motor current signature analysis to detect fault in induction motor drive – fundamentals, data interpretation and industrial case histories. *Proceeding of the thirty-second turbomachinery symposium*. Texas, USA, 2003. pp. 145–153.
12. Vaimann T., Kallaste A. Detection of broken rotor bars in three-phase squirrel-cage induction motor using fast Fourier transform. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering»*. Pärnu, Estonia, 2011. pp. 52–56.
13. Kostic M., Nikolic A. Negative consequence of motor voltage asymmetry and its influence to the unefficient energy usage. *WSEAS transactions on circuits and systems*, 2010, iss. 8, vol. 9, pp. 547–556.
14. Liang B., Payne B., Ball A., Iwnicki S. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, no. 61, pp. 1–15.
15. Adamenko A.I. *Metody issledovaniya nesimmetrichnykh asinkhronnykh mashin* [Ways of study of an asymmetrical induction motor]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1969. 356 p.
16. Sorkind M. Asinkhronnye elektrodvigateli 0.4 kV. Avariynye rezhimy raboty [0.4 kV induction motors. Emergency modes]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 2 (32). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/> (accessed 2 November 2015).
17. Kulichenkov V.P. Vliyaniye nesimmetrii napryazheniy na poteri elektroenergii [Voltage asymmetry influence on electrical energy losses]. *Energetika i TEK*, 2009, September, no. 9 (78). Available at: http://www.energetika.by/arch/~year__m21=2009-page__m21=2 (accessed 2 November 2015).
18. Nikiyan N.G. *Mnogofaznaya realnaya asinkhronnaya mashina: matematicheskoe modelirovanie, metody i sredstva diagnostiki* [Real polyphase induction motor: mathematical modeling and diagnostic aids]. Orenburg, GOU VPO OGU Press, 2003. 334 p.
19. Petukhov B.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelay. Metod spektralnogo analiza potrebyaemogo toka [Induction motor state diagnostic. Input current spectral analysis method]. *Novosti elektrotehniki*, 2005, no. 31, pp. 50–52.
20. Lavrenov E.O. Imitatsionnaya model asinkhronnoy mashiny s uchedom elektricheskoy nesimmetrii i nasyscheniya magnitnoy tsepi [Induction motor model with account of electrical asymmetry]

- try and magnetic core saturation]. *Journal «ELECTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost»*, 2015, no. 3, pp. 25–30.
21. Lavrenov E.O. Matematicheskaya model dlya issledovaniya rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya s faznym rotorom pri nesimmetrii v tsepi rotora [Mathematical model to research modes of wound-rotor induction motor with asymmetry in rotor circuit]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchennykh «Nauka, tekhnologii, innovatsii – 2012»* [Proc. All-Russian Scien. Conf. of Young Researchers. Science, Technology, Innovations – 2012]. Novosibirsk, 2012. pp. 304–305.
22. Tonn D.A. Analiz analiticheskikh metodov, primenyaemykh dlya rascheta nesimmetrichnykh asinkhronnykh mashin [Analysis of analytical methods for asymmetrical induction motor calculation]. *Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya*, 2006, no. 1, pp. 74–76.
23. Lazarev Yu. *Modelirovaniye protsessov i sistem v MATLAB* [Processes and systems modeling using MATLAB]. St. Petersburg, BHV Publ. group, 2005. 512 p.

Received: 14 November 2015.

УДК 553.982.2 + 504.062.2

НЕФТЕГАЗОВАЯ НАУКА И ПРАКТИКА XXI ВЕКА: НОВЫЕ ИДЕИ И ПАРАДИГМЫ

Запивалов Николай Петрович,

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3. E-mail: ZapivalovNP@ipgg.sbras.ru

Актуальность работы определяется необходимостью сосредоточить научную мысль и практические усилия на изучении и управлении «жизнью» месторождений на основе принципиально новых концепций в нефтегазовой геологии, что особенно важно для высшего профессионального образования.

Цель работы: обозначить новые тенденции и подходы в развитии нефтегазовой геологии; обосновать применение реабилитационных циклов в процессе освоения нефтегазовых месторождений, особенно в период их активной (форсированной) разработки; установить порог устойчивости состояния флюидонасыщенных систем; предложить метод моделирования динамики нефтегазовых месторождений.

Методы исследования. Автор применяет широкий спектр методических приемов, включая собственные исследования на скважинах (керн, ГИС, КВД и т. д.) и многолетние наблюдения и обобщения первичных источников и материалов по многим нефтегазоносным провинциям мира, особенно Западной Сибири.

Результаты. Обосновано применение реабилитационных циклов в процессе освоения нефтегазовых месторождений. Дана эмпирическая оценка значения критического порога устойчивого состояния флюидонасыщенной системы в процессе разработки месторождения, равного величине депрессии на пласт 5–8 МПа. Предложен и обоснован метод моделирования динамики состояний углеводородных месторождений с помощью эволюционного уравнения вида $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = \mathbf{Z}(\mathbf{p}, \mathbf{a}, t)$. Предложен метод технологического инициирования ускоренного процесса метасоматической доломитизации в карбонатных коллекторах, направленный на создание или обновление высокопродуктивных очагов на месторождении.

Предлагаются инновационные концепции, идеи и подходы для дальнейшего развития научной мысли в нефтегазовой сфере. Автор считает, что в настоящее время следует сосредоточиться на рациональной разработке действующих месторождений с целью щадящей выработки остаточной (трудноизвлекаемой) нефти (Improved Oil Recovery), а также на обнаружении новых, в том числе вторичных углеводородных скоплений по всему стратиграфическому разрезу (включая глубинные горизонты и различные породно-флюидные ассоциации) в районах с развитой многоплановой инфраструктурой. Применение реабилитационных циклов позволит обеспечить быстрое восстановление энергии пласта и фильтрационных свойств. В итоге это повысит длительность эксплуатации объекта и конечную нефтеотдачу. Необходимость постоянных наблюдений в непрерывном режиме за изменениями в самом флюидонасыщенном пласте определяет острую потребность в создании научно-технологических полигонов в различных нефтегазовых районах.

Ключевые слова:

Генезис нефти, «жизнь» месторождения, реабилитационные циклы, остаточная нефть, метасоматоз.

Making the next giant leap in Petroleum Geosciences!

Введение. Новые подходы в нефтегазовой геологии

В нефтегеологической науке XXI в. преобладают идеи современной нелинейной динамики с ее концепциями хаоса и самоорганизации.

Установлено, что углеводороды имеются во всех слоях земной коры, а также предполагаются в космосе. Имеется много различных достаточно авторитетных точек зрения на генезис углеводородов [1–2].

Многолетний опыт работы в нефтегазовой геологии привел автора к выводу об ограниченной применимости классической органической гипотезы, хотя именно он впервые в Западной Сибири в 1958 г. на основе изучения опорных скважин в марьяновской (впоследствии переименованной в баженовскую) свите (верхняя Юра) выделил нефтематеринскую толщу (геохимическая пачка А). Этому была посвящена кандидатская диссертация. Но сейчас у автора другая парадигма, не пред-

полагающая приверженности какой-либо одной концепции генезиса нефти.

Создать общую теорию нафтидогенеза, пригодную для любых геологических условий, видимо, невозможно. Выделение региональных нефтематеринских толщ в качестве единого и обязательного источника нефтегазообразования является некорректным.

А. Леворсен еще в прошлом веке пришел к выводу, что нефтематеринские толщи никакого отношения к практике поисково-разведочных работ не имеют. Он утверждал: «Проблема происхождения нефти и газа теряет в какой-то мере свое значение в качестве обязательной предпосылки для постановки поисковых работ. Причиной является то, что нефть и нефтеподобные УВ обнаружены почти во всех неколлекторских породах. Количество остаточной нефти (микронепти), находящейся в рассеянном состоянии в этих породах, превышает все

разведанные запасы нефти и газа на земном шаре. Следовательно, нет необходимости искать особые материнские породы» [3, с. 488].

Надо признать и то, что различные виды палеореконструкций по существу являются виртуальными и вряд ли могут считаться уверенными ориентирами для выбора благоприятных нефтегазовых объектов, поскольку любая флюидопородная система подвергается вторичным, наложенным процессам. Особенно важно учитывать метасоматоз. Поэтому мы имеем дело с молодыми залежами и современными фильтрационно-емкостными параметрами пласта; их преобразование может быть очень быстротечным. Принципы возрастной аналогии и методика расчетов категорийных запасов по эталонам не отвечают требованиям достоверности решения нефтегеологических задач. Н.А. Еременко и Дж. Чилингар [4] утверждали, что в очень короткое геологическое время коллектор может стать покрывкой, а покрывка – коллектором.

Скопления нефти и газа обнаружены во всех типах пород и во всех стратиграфических горизонтах на суше и в акваториях. По существу, наша планета является единым нефтяным полигоном.

Мифы о «пике нефти» [5] опровергнуты новыми доказательствами и фактами [6–7]. Месторождения углеводородов могут быть открыты в самых неожиданных местах и условиях. Темпы и объемы добычи нефти и газа, а также цены зависят от различных природных, техногенных и рыночных флуктуаций, включая многие геополитические факторы. Но век углеводородной цивилизации никогда не закончится. Это подтверждается наличием и открытием новых разнообразных источников углеводородов (традиционных и нетрадиционных), а также созданием инновационных методов и технологий их добычи и утилизации. Это убедительно демонстрируют следующие графические материалы: динамика доказанных запасов нефти за последние 20 лет (рис. 1), динамика добычи

нефти в течение всего обозримого периода человеческой деятельности (рис. 2), а также динамика потребления нефти в мире (рис. 3).

70 стран в мире имеют разведанные запасы нефти, более 65 стран осуществляют добычу нефти, и практически все государства мира в той или иной степени используют углеводородное сырье для различных целей.

Ясно, что углеводородных ресурсов в земных недрах много, но требуется разумное (научное) использование этих крайне важных для человечества богатств. Русский поэт XIX века А.К. Толстой писал: «Земля наша богата, порядка только нет».

Надо признать, что в России тоже постоянно увеличивается добыча нефти, за исключением периода перестройки и смены общественно-политической формации (1989–2001 гг.) (рис. 4).

Исследования, обобщения и результаты

Нефтегазонасыщенный пласт представляет собой целостную взаимосвязанную систему: породы (минералы) + флюиды (нефть, газ, вода). Залежь нефти – это «живая» флюидопородная система, поэтому ее жизнь подчиняется законам спонтанной саморегуляции. Следует сосредоточить научную мысль и практические усилия на изучении и управлении «жизнью» месторождений. Необходимо учитывать, что эта «жизнь» зависит от многих градиентных факторов в быстротечном режиме. Залежь нефти может сформироваться, расформироваться и вновь образоваться. Поэтому многие скопления нефти и газа являются молодыми.

Промысловые исследования и наблюдения во многих регионах позволили установить, что критическим порогом устойчивого состояния флюидонасыщенной системы в процессе разработки месторождения является величина депрессии на пласт 5–8 МПа [8, 9]. Это значение является практически универсальным и применимо для всех типов коллекторов.

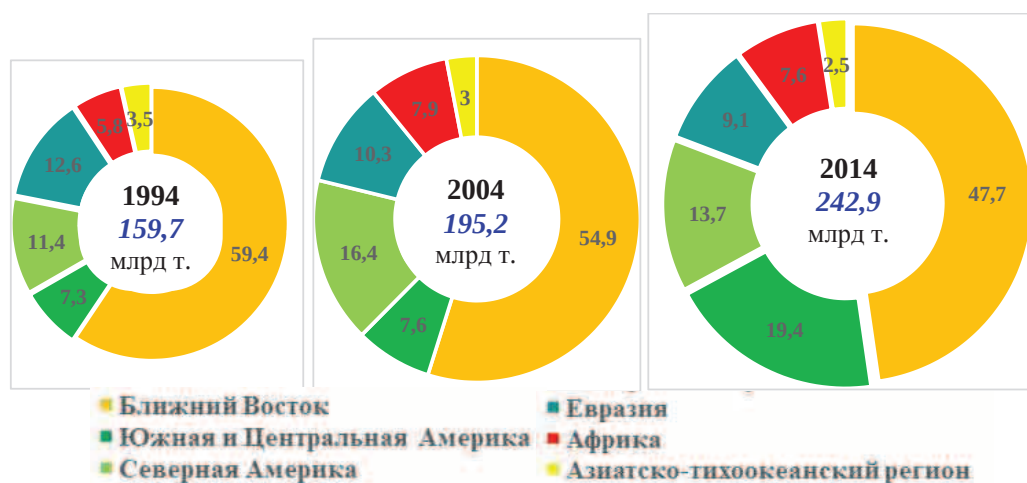


Рис. 1. Распределение доказанных запасов нефти в мире в 1994, 2004 и 2014 гг., % (по данным BP Statistical Review of World Energy 2015)

Fig. 1. Distribution of proved oil reserves in the world in 1994, 2004 and 2014, % (according to BP Statistical Review of World Energy 2015)

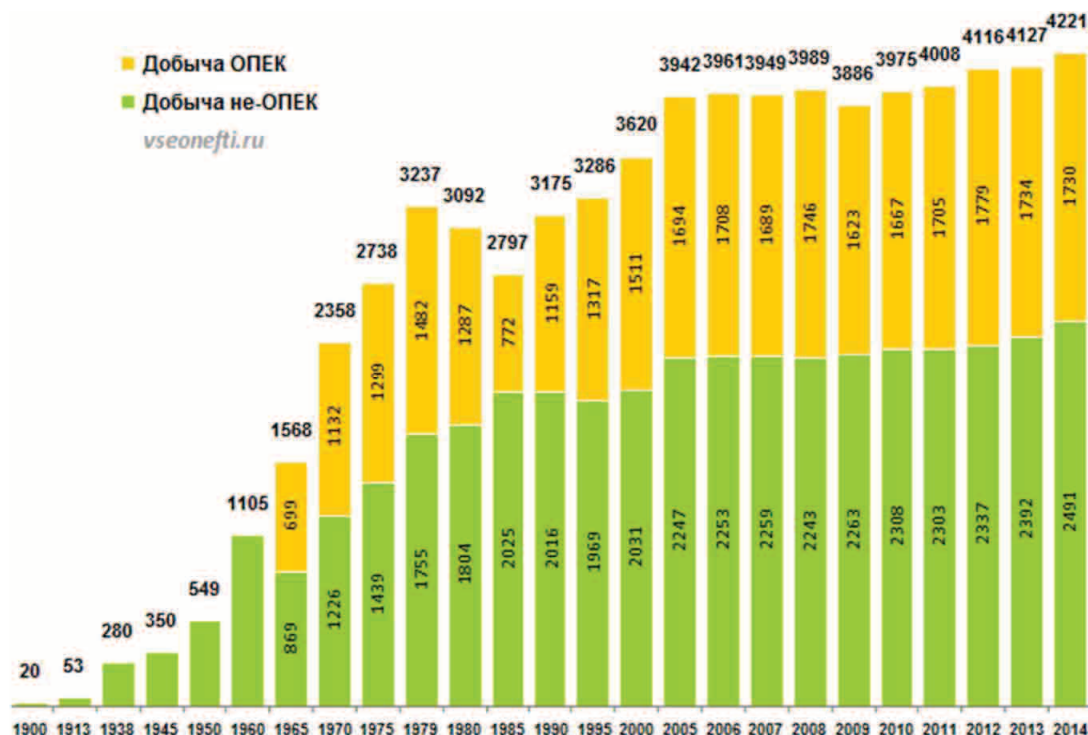


Рис. 2. Динамика добычи нефти в мире, млн т. (по данным BP Statistical Review of World Energy 2015)

Fig. 2. Dynamics of oil production in the world, mln t (according to BP Statistical Review of World Energy 2015)



ИСТОЧНИК: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY

Рис. 3. Динамика потребления нефти в мире, тыс. баррелей в сутки (1 тонна = 7 баррелей) (по данным BP Statistical Review of World Energy 2015)

Fig. 3. Dynamics of oil consumption in the world, thousand barrels per day (1 t = 7 barrels) (according to BP Statistical Review of World Energy 2015)

Флюидодинамические системы (залежи, месторождения) являются по многим параметрам очаговыми, вероятнее всего, фрактальными объектами с неравномерной продуктивностью [10].

Примером нарушения естественных природных процессов является Верх-Тарское месторождение, которое было уничтожено за 10 лет ускоренной выработки активных запасов за счет завышенных темпов добычи и неумеренного применения ГРП и заводнения [11] (рис. 5).

Автор в течение многих лет предлагает создать на основе этого уникального района, где есть нефть в песчаниках мезозоя (Верх-Тарское), карбонатных породах палеозоя (Малоичское) и даже в гранитах Межовского массива, научно-технологический и образовательный федеральный полигон для натурных исследований, апробации новых и тиражирования инновационных технологий по всему спектру нефтегазового производства, но активной поддержки пока не получил.

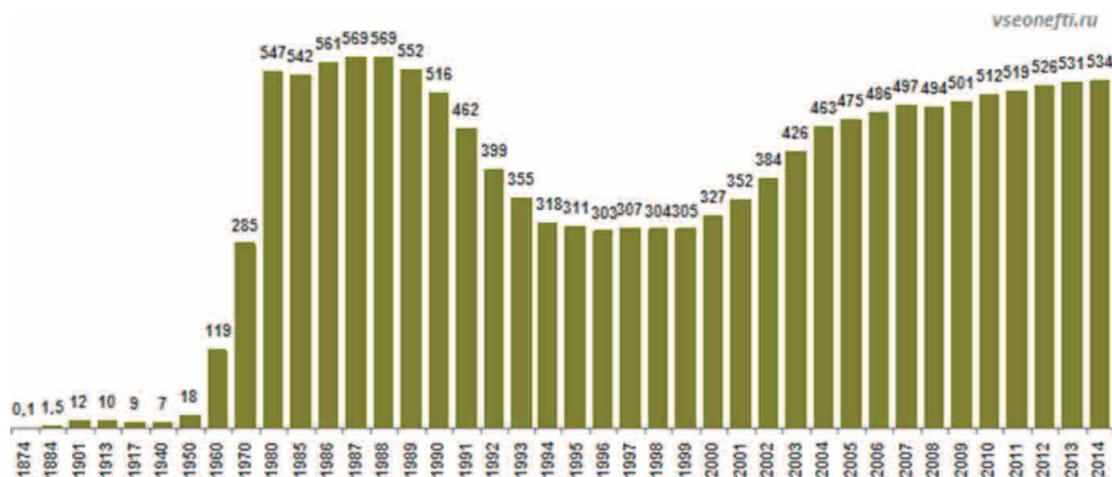


Рис. 4. Динамика добычи нефти в России, млн т (по данным сайта «Все о нефти»: <http://vseonefti.ru>)

Fig. 4. Dynamics of oil production in Russia, mln t (according to electronic resource «Everything about oil» <http://vseonefti.ru/>)

Именно Верх-Тарское месторождение нуждается в падающей технологической реабилитации, поскольку природная реабилитация может оказаться очень длительной. Есть методы и предложения, но недропользователь не готов.

Будем ждать восполнения запасов и новой жизни этого многострадального месторождения. Автор как первооткрыватель очень надеется.

Уравнение состояния флюидонасыщенной системы

В первом приближении динамика состояний углеводородных месторождений может описываться эволюционным уравнением вида

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = \mathbf{Z}(\mathbf{p}, \mathbf{a}, t),$$

где $\mathbf{p}=(p_1, p_2, \dots, p_k)$ – выбранный набор динамических величин, характеризующих состояние систе-

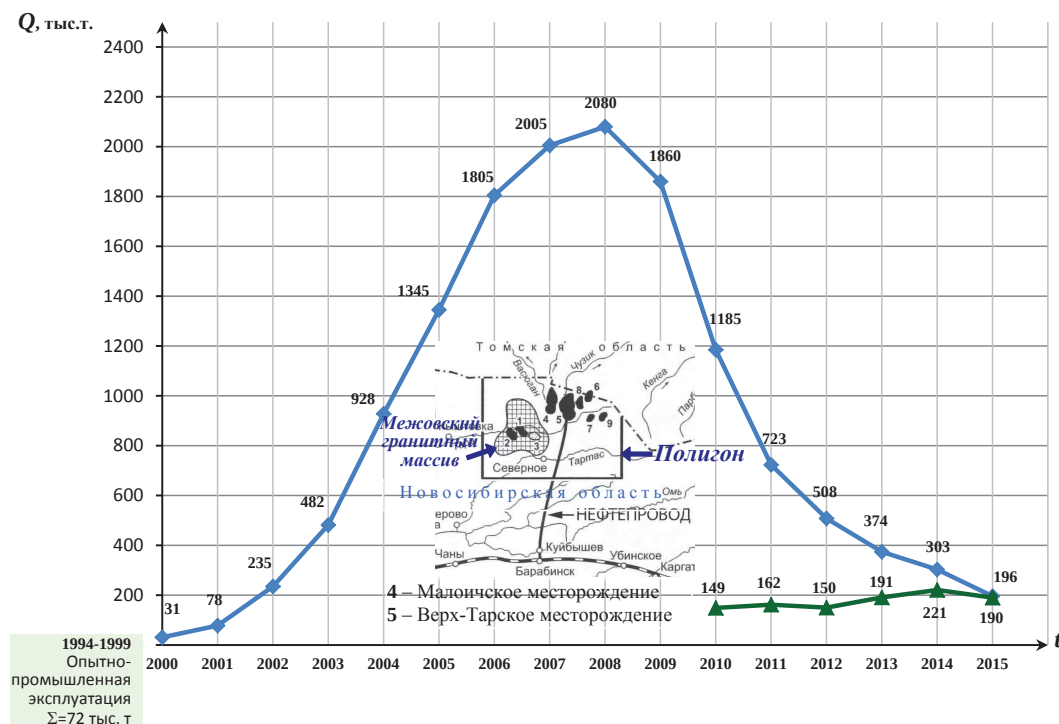


Рис. 5. Динамика добычи нефти на Верх-Тарском месторождении по годам. Суммарная добыча на 01.01.2015 г. составила **14 млн 46 тыс. т**. Геологические запасы – **52 млн т**. Зеленым показана начавшаяся позднее добыча нефти на Малоичском месторождении из палеозоя. В 2015 г. добыча снизилась по сравнению с 2014 г. на 26 %

Fig. 5. Dynamics of oil production at Verkh-Tarskoye oilfield. As of January 1, 2015, the total of oil production was **14 046 000 t**. The geological reserves are **52 000 000 t**. Oil production at the Maloichskoye oilfield from the Paleozoic was started later; it is shown in green

мы; $a=(a_1, a_2, \dots, a_i)$ – набор параметров системы; t – временная переменная; Z – оператор, скорее всего, нелинейный, действующий на p и универсальный для всех (или для достаточно представительного класса) месторождений, который должен быть определен на основании эмпирических закономерностей развития углеводородных скоплений.

Такой вид имеют уравнения динамики механических систем, жидкостей и газов, классических физических полей, атомных систем, галактик и пр. Во всех перечисленных областях уравнения такого вида являются основой успешного исследования самых сложных процессов и явлений.

Наиболее эффективным представляется построение натурных флюидодинамических моделей на основе фактических данных, отраженных в уравнениях переноса и баланса углеводородных масс и сопутствующих компонентов. Это особенно важно для подтверждения закона о критическом пороге состояния нефтегазонасыщенных систем, эмпирически равному 5–8 МПа депрессии на пласт, и оценки очаговой подпитки месторождений.

О нерешенных задачах

Все еще остается нераскрытой «тайна» большой нефти в глубинном комплексе Западной Сибири (палеозой и докембрий), в том числе в погребенных гранитах [12]. Много творческих усилий и практических дел автор посвятил именно этой проблеме. Этот марафон длится уже более 50 лет. Препятствием является геологическая неопределенность классического термина «фундамент». А.А. Трофимук называл палеозой «золотой подложкой Западной Сибири».

Задача скорейшего масштабного промышленного освоения сугубо прогнозных нефтегазовых ресурсов российских арктических акваторий имеет непреодолимые трудности в обозримой перспективе XXI в. Геологи могут решить некоторые геополитические задачи, но не более того. Между тем огромная заполярная сухопутная территория Западной Сибири – это совсем другая, почти решенная задача.

О баженитах и сланцевой нефти Западной Сибири можно складывать легенды и даже достигать некоторых успехов, но главного нефтяного дыхания, видимо, не получить. По данным исследований [13], отложения баженовской свиты по своей геохимической специализации относятся к формации металлоносных черных сланцев; баженовская свита, по сравнению со средними данными для черных сланцев мира, более чем в 3 раза обогащена U, Zn, Sr, Ba и в 1,5 раза – As, Co и Tb. Содержание урана в породах колеблется от 2 до 171 г/т, при среднем его содержании в 40,9 г/т. Ориентировочно можно оценивать ресурсы этого металла в исследуемом районе на уровне 3 млрд т.

Встает, возможно, не праздный вопрос: может быть, из Западно-Сибирских баженитов добывать уран и другие металлы, хотя бы в отдельных перспективных районах (может быть, вместе с нефтью)?

Обсуждение, предложения и выводы

В настоящее время в мире повсеместно осуществляется форсированная коммерческая добыча легко извлекаемой нефти всеми доступными сверхинтенсивными методами. Остаточная нефть (запасы) к настоящему моменту составляет 55–70 %. Чтобы добывать эту остаточную (трудно-извлекаемую) нефть из продуктивных пластов, нужны принципиально новые идеи и технологии. Большой интерес и очевидные перспективы представляют прорывные нанотехнологии в нефтегазовой геологии [9, 14].

В научных исследованиях, в прогнозах, поисках, разведке и разработке месторождений следует ориентироваться на установление зон (очагов) с активным градиентным флюидным режимом в каждый отдельный момент времени. Методов и технологий таких инновационных процедур сейчас достаточно, включая высотные и космические съемки. Рекомендуются, например, методика ДФМ [15] и технология спектрального анализа микросейсм (SAM) [16]. Эти технологии позволяют четко выявлять высокопродуктивные очаги в процессе разведки и разработки месторождений.

В процессе освоения нефтегазовых месторождений, особенно в период их активной (форсированной) разработки, необходимо применять реабилитационные циклы, способствующие быстрому восстановлению энергии пласта и фильтрационных свойств, а также *образованию новых объемов углеводородных масс*. В итоге это обеспечит длительную жизнедеятельность объекта, высокую конечную нефтеотдачу, соблюдение экологических стандартов, а также существенную экономию труда и капитала.

Активные процессы современной очаговой подпитки углеводородных скоплений и соответствующее увеличение запасов безусловно представляют научный и практический интерес, определяя направление нанотехнологической нефтегазовой революции. Наглядным и убедительным примером очаговой подпитки углеводородных скоплений может служить Ромашкинское месторождение (Татарстан) (рис. 6).

По оценке академика АН РТ Р.Х. Муслимова, на Ромашкинском месторождении ежегодно происходит восполнение около 3 млн т. нефти. По его мнению, завершающая стадия разработки месторождения может длиться сотни лет [17–18]. Подпитка отдельных зон и очагов на многих разрабатываемых месторождениях и образование новых объемов углеводородов является доказанным фактом.

Многие скважины и месторождения по разным причинам подлежат ликвидации. Необходима временная консервация этих скважин для осуществления реабилитационных циклов [19–20] с возможной подпиткой, после чего станет возможна их повторная эксплуатация. Эта идея подтверждена фактами, приведенными в недавней статье И.А. Дьячука [21]. Однако переформирование залежей по принципу капиллярно-гравитационной

сегрегации представляет упрощенный вариант. Природные процессы намного сложнее.

Особый интерес представляют доломиты в карбонатных толщах, образованных за счет позднего метасоматоза. Наноразмерные метасоматические процессы увеличивают не только пористость, но и проницаемость, способствуют образованию хороших и часто высокодебитных карбонатных коллекторов. Можно инициировать ускоренный техногенный процесс метасоматической доломитизации и создавать или обновлять высокопродуктивные очаги на месторождении [22–24]. В принципе внедрение в науку и практику нанотехнологических подходов крайне необходимо [10].

Необходимо в различных нефтегазовых районах организовать научно-технологические полигоны, аналогичные полигону GBRN (Global Basin Research Network) у побережья Луизианы, где расположено гигантское месторождение Мексиканского залива «Юджин Айленд». Если это слишком затратно или трудно по каким-либо другим причинам, то нужно иметь хотя бы по одной научно-исследовательской скважине на каждом работающем месторождении.

Нужны постоянные наблюдения в непрерывном режиме за изменениями в самом флюидонасыщенном пласте.

Омар Хайям утверждал: «Чтобы избежать одной ошибки, надо сделать тысячу наблюдений и тысячу измерений».

Можно напомнить, что в Кольской сверхглубокой скважине (12 262 метра) многие априорные геологические и геофизические модели оказались неподтвержденными.

Разнообразные виртуальные модели (геохимические, сейсмические, математические и др.) не могут достоверно отражать динамику жизни месторождения. Известный специалист по математической статистике профессор Джордж И.П. Бокс писал: «В сущности, все модели неправильны, но некоторые из них бывают полезными» («All models are wrong but some are useful») [25].

Это же четко показал Сяо-Хуи Ву (старший консультант по вопросам моделирования и применения компьютерных технологий в науках о Земле Научно-исследовательской компании в области разведки и добычи ExxonMobil) в своей работе «Как прогнозировать производительность пласта в условиях геологической неопределенности в нескольких масштабах?». Он утверждает: «Снизить источник неопределенности можно, сократив числовые ошибки и ошибки моделирования на основе выборочных данных» [26].

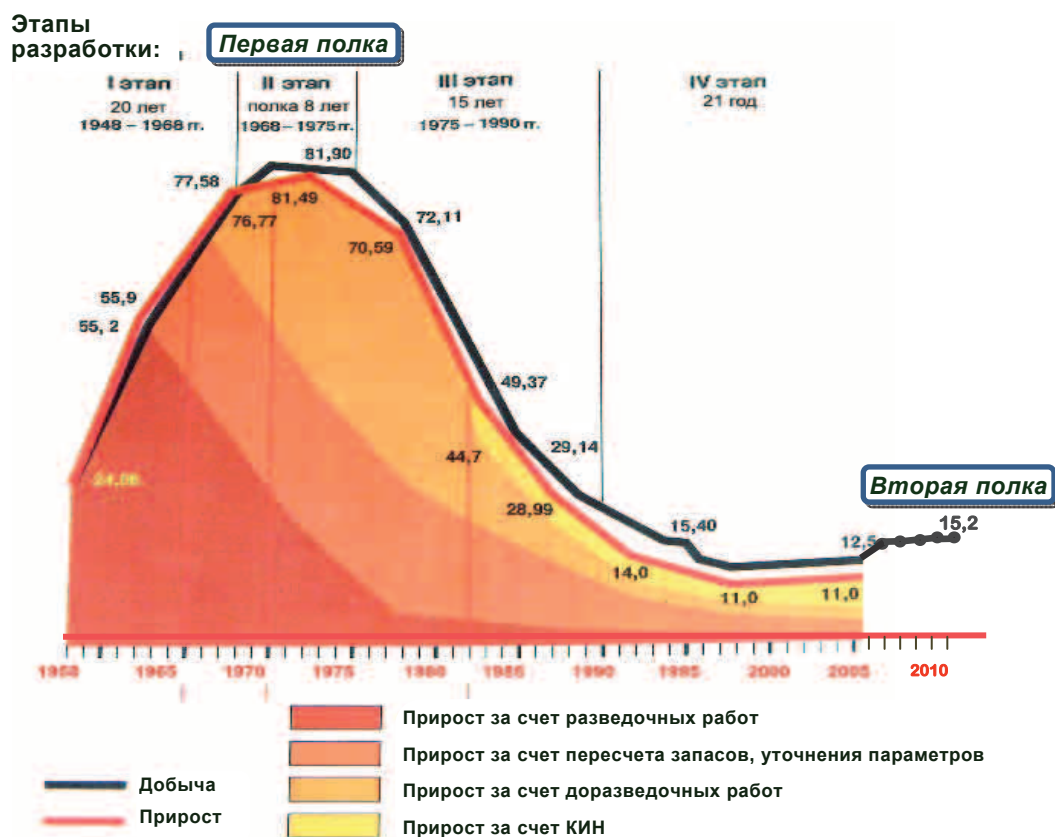


Рис. 6. График «жизни» Ромашкинского месторождения. Добыча и прирост запасов нефти в млн т

Fig. 6. Curve of the Romashkinskoe oilfield «life». Oil production and reserve increment, mln t

Геофлюидодинамический мониторинг земных глубин резко отстает от космического мониторинга. Это отставание может оказаться фатальным для цивилизации!

Нефтяная судьба России может иметь многообещающее продолжение, которое зависит от многих факторов, включая степень вовлеченности фундаментальной науки.

Рекомендации для практической реализации в ближайшей перспективе XXI века

В настоящее время следует сосредоточиться на рациональной разработке действующих месторождений с целью падающей выработки остаточной (трудноизвлекаемой) нефти (Improved Oil Recove-

ru), а также на обнаружении новых, в том числе вторичных, углеводородных скоплений по всему стратиграфическому разрезу (включая глубинные горизонты и различные породно-флюидные ассоциации) в районах с развитой многоплановой инфраструктурой.

Если этого не сделать, то огромные массы утвержденных остаточных запасов нефти останутся в недрах Западной Сибири до следующих «новых» открытий уже ранее открытой нефти.

Для решения всех этих и многих других проблем нужен весь могущественный потенциал российской науки. Недропользование должно быть научным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молчанов В.И., Гонцов А.А. Моделирование нефтегазообразования. – Новосибирск: ОИ ГГМ, 1992. – 246 с.
2. Баренбаум А.А. Научная революция в проблеме происхождения нефти и газа. Новая нефтегазовая парадигма // Георесурсы. – 2014. – № 4 (59). – С. 3–9.
3. Леворсен А. Геология нефти и газа. – М.: Мир, 1970. – Серия «Науки о земле». – Т. 22. – 638 с.
4. Еременко Н.А., Чилингар Г.В. Геология нефти и газа на рубеже веков. – М.: Наука, 1996. – 176 с.
5. Hubbert K.M. Nuclear energy and the fossil fuels // Proceedings of American Petroleum Institute Spring Meeting «Drilling and Production Practice». – Houston, Texas, 1956. – P. 7–25.
6. Klare M. Peak oil is dead // Oil and Maritime. – 2014. – June. – P. 36–38.
7. Yergin D. There will be oil // The Wall Street Journal. – 2011. – September 17. URL: <http://www.wsj.com/articles/SB10001424053111904060604576572552998674340> (дата обращения: 12.09.2015).
8. Запивалов Н.П., Попов И.П. Флюидодинамические модели залежей нефти и газа. – Новосибирск: Гео, 2003. – 198 с.
9. Запивалов Н.П. Динамика жизни нефтяного месторождения // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 206–211.
10. Запивалов Н.П., Смирнов Г.И., Харитонов В.И. Фракталы и наноструктуры в нефтегазовой геологии и геофизике. – Новосибирск: ГЕО, 2009. – 131 с.
11. Запивалов Н.П. Новосибирская нефть-2010 как зеркало российской «нефтянки» // Эко: всероссийский экономический журнал. – 2010. – № 9. – С. 31–49.
12. Проблемы нефтегазоносности верхнепротерозойских и палеозойских комплексов Беларуси и Сибири: монография / Р.Е. Айзберг, Р.Г. Гарецкий, Н.П. Запивалов и др. / под ред. В.А. Москвича. – Минск: БЕЛГЕО, 2003. – 360 с.
13. Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-микроскопических методов исследований / Л.П. Рихванов, Д.Г. Усольцев, С.С. Ильенко, А.В. Ежова // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 50–63.
14. Хавкин А.Я. Актуальные стратегические задачи нефтедобычи // 25 лет РАЕН: сборник статей. Секция нефти и газа. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – С. 11–21.
15. Писецкий В.Б. Прогноз флюидодинамических параметров бассейна по сейсмическим данным. – Екатеринбург: УТТГА, 2011. – 10 с.
16. Ведерников Г.В. Прогноз залежей углеводородов по характеристикам микросейсм: избр. статьи. – Новосибирск: Изд-во «Свинын и сыновья», 2012. – 202 с.
17. Иктисанов В.А. Основные загадки нефти // 25 лет РАЕН: сборник статей. Секция нефти и газа. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. – С. 186–191.
18. Муслимов Р.Х. Новый взгляд на перспективы развития супергигантского Ромашкинского месторождения // Геология нефти и газа. – 2007. – № 1. – С. 3–12.
19. Запивалов Н.П. Пять неотложных мер нефтедобычи Западной Сибири // Эко: всероссийский экономический журнал. – 2015. – № 5. – С. 111–117.
20. Беднаржевский С.С., Запивалов Н.П., Смирнов Г.И. Реабилитационные циклы нелинейной динамики нефтегазовых месторождений как основа повышения их продуктивности // Наука и бизнес: пути развития. – № 4 (46). – 2015. – С. 27–31.
21. Дьячук И.А. К вопросу перестроения нефтяных месторождений и пластов // Георесурсы. – 2015. – № 1 (60). – С. 39–45.
22. Запивалов Н.П. Инновационные технологии в разведке и разработке нефтегазовых месторождений на основе новой геологической парадигмы // Георесурсы. – № 1 (56). – 2014. – С. 23–28.
23. Запивалов Н.П. Метасоматическая доломитизация и нефтегазоносность карбонатных пород (нанозффекты образования вторичных высокопродуктивных коллекторов) // Наука и технологии в России. – 2009. – № 2. – Т. 88. – С. 31–39.
24. Поспелов Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. – Новосибирск: Наука СО, 1973. – 356 с.
25. Box G.E.P., Draper N.R. Empirical model building and response surfaces. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 424 p.
26. Xiao-Hui Wu. How to predict reservoir performance with subsurface uncertainty at multiple scales? // Society of Petroleum Engineers: Distinguished Lecturer Program, 2015. – Lecture.

Поступила 24.09.2015 г.

UDC 553.982.2 + 504.062.2

PETROLEUM GEOLOGY: SCIENCE AND PRACTICE IN THE 21st CENTURY. NEW IDEAS AND PARADIGMS

Nikolay P. Zapivalov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia; Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the SB RAS,
3, Academician Koptug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
E-mail: ZapivalovNP@ipgg.sbras.ru

The current importance of the paper is determined by the vital necessity that research and practical efforts should be now focused on studying and controlling the oilfield «life», based on conceptually new ideas and methods in petroleum geology.

The aim of the article. To outline new trends and approaches in the development of petroleum geology. To substantiate the use of rehabilitation cycles in the process of developing an oilfield, and especially at its active (forced) stage. To define the perturbation threshold for state equilibrium of a fluid-saturated system. To propose a method for simulating dynamics of a hydrocarbon deposit.

Methods used in the study. The author uses a wide range of methodic approaches and techniques, including his own well studies (drill samples, geophysical well logging data, pressure recovery curve, etc.) as well as long-term observations and generalizations of primary sources and materials on a great number of petroleum provinces in the world and especially in West Siberia.

Results. The use of rehabilitation cycles in the process of developing an oilfield is substantiated. An empirical estimation is given of the value of critical perturbation for state equilibrium of a fluid-saturated system in the process of developing an oilfield, equal to formation depression of 5–8 MPa. A method for simulating oilfield dynamics is suggested and the use of an evolutionary equation

$\frac{\partial p}{\partial t} = Z(p, a, t)$ is justified. A method is proposed to create or renew highly-productive foci at an oilfield through technogenic initiation of an accelerated metasomatic dolomitisation in carbonate reservoirs.

Innovative conceptions and approaches are suggested for the further development of petroleum science. The author's opinion is that at present efforts should be focused on the efficient well-targeted development of the active oilfields in order to provide for the production of the residual (hard-to-extract) oil in a soft, sparing and non-damaging way (Improved Oil Recovery) as well as on discovering new hydrocarbon accumulations, including secondary ones, throughout the whole stratigraphic section, with all depth horizons and various rock-fluid associations, in regions where a well-developed diversified infrastructure is already available. The use of rehabilitation cycles will make it possible to restore the energy potential of the stratum and filtration properties of the rock. In the long run, it will provide for an increased longevity of the object and higher final oil recovery. The urgent demand for constant real-time monitoring of the current changes inside the fluid-saturated stratum makes it extremely desirable to create research-and-development polygons in various petroleum regions.

Key words:

Origin of petroleum, «life» of an oilfield, rehabilitation cycles, residual oil, metasomatism.

REFERENCES

1. Molchanov V.I., Gontsov A.A. *Modelirovanie neftegazooobrazovaniya* [Modeling of oil and gas formation]. Novosibirsk, OIGGM (United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy) Publ., 1992. 246 p.
2. Barenbaum A.A. Nauchnaya revolyutsiya v probleme proiskhozhdeniya nefti i gaza. Novaya neftegazovaya paradigma [The scientific revolution in the oil and gas origin issue. New oil and gas paradigm]. *Georesources*, 2014, vol. 59, no. 4, pp. 3–9.
3. Levorsen A.I. *Geologiya nefti i gaza* [Geology of petroleum]. Moscow, «Mir», «Earth sciences» series, 1970, vol. 22. 638 p.
4. Eremenko N.A., Chilingar G.V. *Geologiya nefti i gaza na rubezhe vekov* [Geology of oil and gas at the turn of the century]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 176 p.
5. Hubbert M.K. Nuclear energy and the fossil fuels. *Proc. of American Petroleum Institute Spring Meeting. Drilling and Production Practice*. Houston, Texas, 1956. pp. 7–25.
6. Klare M. Peak oil is dead. *Oil and Maritime*, 2014, June, pp. 36–38.
7. Yergin D. There will be oil. *The Wall Street Journal*, 2011, September 17. Available at: <http://www.wsj.com/articles/SB10001424053111904060604576572552998674340> (accessed 12 September 2015).
8. Zapivalov N.P., Popov I.P. *Flyuidodinamicheskie modeli zalezhey nefti i gaza* [Fluidodynamic models for petroleum systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003. 198 p.
9. Zapivalov N.P. Dinamika zhizni neftyanogo mestorozhdeniya [Dynamics of oilfield life]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 206–211.
10. Zapivalov N.P., Smirnov G.I., Kharitonov V.I. *Fraktaly i nanostruktury v neftegazovoy geologii i geofizike* [Fractals and nanostructures in petroleum geology and geophysics]. Novosibirsk, Geo Publ., 2009. 131 p.
11. Zapivalov N.P. Novosibirskaya nef't-2010 kak zerkalo rossiyskoy nef'tyanki [Novosibirsk oil as a mirror of Russian oil scenario]. *Eko: vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal*, 2010, no. 9, pp. 31–49.
12. Ayzberg R.E., Garetskiy R.G., Zapivalov N.P. et al. *Problemy neftegazonosnosti verkhneproterozoysskikh i paleozoysskikh kompleksov Belarusi i Sibiri* [Problems of oil-and-gas capacity of the Upper-Proterozoic and Paleozoic complexes in Belarus and Siberia]. Minsk, BelGeo Publ., 2003. 360 p.
13. Rikhvanov L.P., Usoltsev D.G., Ilenok S.S., Ezhova A.V. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri po dannym yadernykh-fizicheskikh i elektronno-mikroskopicheskikh metodov issledovaniy [Mineralogical and geochemical features of the Bazhenov formation, West Siberia, according to nuclear-physics and electron-microscopic methods of research]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 50–63.
14. Khavkin A.Ya. Aktualnye strategicheskie zadachi nefte dobychi [Key strategic problems in oil production at present]. *25 let RA-*

- EN: *sbornik statey. Sektsiya nefiti i gaza* [25 years of RANS: collected works (Oil and Gas Section)]. Moscow, Publishing centre of Gubkin Russian State Oil-and-Gas University, 2015. pp. 11–21.
15. Pisetskiy V.B. *Prognoz flyuidodinamicheskikh parametrov basseyna po seysmicheskim dannym* [Prognosis of fluid-dynamic parameters of a basin based on seismic data]. Ekaterinburg, Ural State Mining University Press, 2011. 10 p.
 16. Vedernikov G.V. *Prognoz zalezhey uglevodorodov po kharakteristikam mikroseyism: izbrannye stati* [Prognosis of hydrocarbon pools by characteristics of microseisms: selected papers]. Novosibirsk, Publishing House «Svinin i synovya», 2012. 201 p.
 17. Iktisanov V.A. *Osnovnye zagadki nefiti* [The main enigmas of oil]. 25 let RAEN: *sbornik statey. Sektsiya nefiti i gaza* [25 years of RANS: collected works (Oil and Gas Section)]. Moscow, Publishing centre of Gubkin Russian State Oil-and-Gas University, 2015. pp. 186–191.
 18. Muslimov R.Kh. *Novyy vzglyad na perspektivy razvitiya supergigantskogo Romashkinskogo mestorozhdeniya* [A new approach to prospects of development of the super-giant Romashkinskoe oilfield]. *Geologiya nefiti i gaza*, 2007, no. 1, pp. 3–12.
 19. Zapivalov N.P. *Pyat neotlozhnykh mer neftedobychi Zapadnoy Sibiri* [Five urgent steps in oil production of West Siberia]. *Eko: vserossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal*, 2015, no. 5, pp. 111–117.
 20. Bednarzhevskiy S.S., Zapivalov N.P., Smirnov G.I. *Reabilitatsionnye tsikly nelineynoy dinamiki neftegazovykh mestorozhdeniy kak osnova povysheniya ikh produktivnosti* [Rehabilitation cycles of nonlinear dynamics of petroleum fields to improve their efficiency]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2015, vol. 46, no. 4, pp. 27–31.
 21. Dyachuk I.A. *K voprosu pereformirovaniya neftyanykh mestorozhdeniy i plastov* [Reformation of oil fields and reservoirs]. *Georesources*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 39–45.
 22. Zapivalov N.P. *Innovatsionnye tekhnologii v razvedke i razrabotke neftegazovykh mestorozhdeniy na osnove novoy geologicheskoy paradigmy* [Innovative technologies in oil and gas fields exploration and development based on the new geological paradigm]. *Georesources*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 23–28.
 23. Zapivalov N.P. *Metasomaticheskaya dolomitizatsiya i neftegazonosnost karbonatnykh porod (nanoeffekty obrazovaniya vtorichnykh vysokoproduktivnykh kollektorov)* [Metasomatic dolomitisation and hydrocarbon saturation of the carbonate rocks: nanoeffects in formation of highly productive reservoirs]. *Nauka i tekhnologiya v Rossii*, 2009, vol. 88, no. 2, pp. 31–39.
 24. Pospelov G.L. *Paradoksy, geologo-geofizicheskaya sushchnost i mekhanizmy metasomatoza* [Paradoxes, geologic-physical nature and mechanisms of metasomatoses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973. 356 p.
 25. Box G.E.P., Draper N.R. *Empirical model building and response surfaces*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1987. 424 p.
 26. Xiao-Hui Wu. *How to predict reservoir performance with subsurface uncertainty at multiple scales? Society of Petroleum Engineers: Distinguished Lecturer Program*, 2015. Lecture.

Received: 24 September 2015.

УДК 621.313.2

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФ-МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ

Харламов Виктор Васильевич,

доктор технических наук, заведующий кафедрой электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: hvv-omgups@mail.ru

Шкодун Павел Константинович,

кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: pkshk@mail.ru

Хлопцов Андрей Сергеевич,

аспирант кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: emoe@omgups.ru

Долгова Анна Владимировна,

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики, прикладной математики и механики Омского государственного университета путей сообщений, Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35. E-mail: lady_annie@mail.ru

Одной из актуальных проблем современного железнодорожного транспорта является повышение достоверности диагностирования технического состояния и энергоэффективности тяговых электродвигателей подвижного состава. Среди методов, положенных в основу систем технического диагностирования тяговых электродвигателей, наиболее перспективным является графо-аналитический метод, позволяющий отображать объект в пространстве диагностических признаков и повысить достоверность диагностирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения достоверности диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей, что существенно влияет на энергоэффективность преобразования электрической энергии в системах электроснабжения железнодорожного транспорта.

Цель работы: создание исходной матрицы граф-модели для формирования таблицы синдромов и получения компонентов достижимости вершин граф-модели; расчет критического расстояния для усечения компонентов достижимости вершин граф-модели и формирование рабочей граф-модели, позволяющей осуществлять контроль качества функционирования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей постоянного тока.

Методы исследования основаны на применении прикладной теории графов. Поставленные задачи решались на основе положений теории электрических машин, с применением методов экспертных оценок, графо-аналитического метода, а также методов математической статистики. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись электронные таблицы Microsoft Excel 2010 и встроенный в них язык программирования Visual Basic for Applications.

Результаты. Уточнена граф-модель коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя. На основании исходной матрицы сформирована матрица частных расстояний. Используя данные матрицы частных расстояний, сформированы синдромы и получены компоненты достижимости вершин граф-модели. Критическое расстояние определено как медиана значений по гистограмме расстояний всех длин маршрутов граф-модели. На основании найденного значения критического расстояния проведено усечение компонентов достижимости и скорректирован состав синдромов. В результате объединения усеченных синдромов сформирована рабочая граф-модель.

Ключевые слова:

Диагностирование, коллекторно-щеточный узел, граф-модель, компонент достижимости, синдром, тяговый электродвигатель.

Введение

Надежность и энергоэффективность тягового электроподвижного состава в значительной степени зависит от стабильной работы тяговых электрических двигателей (ТЭД) [1, 2]. Исправная работа ТЭД во многом обеспечивает реализацию максимальной производительности локомотива [3]. Одним из приоритетных направлений ОАО «Российские железные дороги» является снижение издержек при ремонте тягового подвижного состава,

обеспечение ресурсосбережения, а также поддержание технического состояния локомотивов, находящихся в эксплуатации [4].

Постановка задачи

Диагностирование сложных технических систем, одной из которых является коллекторно-щеточный узел (КЩУ) ТЭД, предполагает комплекс мероприятий по контролю и прогнозированию технического состояния. Техническое диагностирова-

ние деталей и узлов ТЭД определяется рядом операций, изложенных в утвержденной технологической документации, в которой предполагается контроль механических и электрических параметров. Контроль перечисленных параметров в ряде случаев не позволяет получать достоверных результатов о техническом состоянии КЩУ ТЭД. Отсюда возникает задача создания комплексной методики технического диагностирования, позволяющей получать достоверные сведения о техническом состоянии КЩУ ТЭД [5, 6].

В основу методики диагностирования положены методы математического анализа и моделирования. Большинство систем технического диагностирования используют информацию о состоянии узла в виде набора диагностических признаков, наиболее полно и достоверно определяющих его технические свойства. Применение графо-аналитического метода отображения объекта в пространстве признаков с построением граф-модели позволит повысить достоверность распознавания дефектов КЩУ ТЭД.

Методика исследований

Решение поставленной задачи основывается на граф-модели диагностирования КЩУ ТЭД в процессе приемо-сдаточных испытаний, параметры которой являются компонентами нелинейного дифференциального уравнения первого порядка, описывающего процесс коммутации в электродвигателе [7]:

$$L \frac{di}{dt} + \sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt} = \Delta u_1(J) - \Delta u_2(J) - iR_s - e_k(t),$$

где $e_L = -L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции; L – индуктивность секции; i – мгновенное значение тока в секции; $e_M = -\sum_{k=1} M_k \frac{di_k}{dt}$ – ЭДС взаимной индукции;

M_k – взаимная индуктивность k -й секции; i_k – мгновенное значение тока в k -й секции; $\Delta u_1(J)$ и $\Delta u_2(J)$ – переходные падения напряжения под набегающим и сбегающим краями щетки; R_s – сопротивление коммутируемой секции; $e_k(t)$ – коммутирующая ЭДС, возникающая в секции при ее взаимодействии с магнитными полями в зоне коммутации.

Исходная граф-модель дополнена рядом диагностических параметров, учет которых позволяет полно отразить сложные процессы, протекающие в узлах ТЭД [8–11].

Воздействие электродугового искрения на поверхность ламели снижает прочность и повышает пластичность ее поверхностного слоя, изменяя структуру и механические свойства коллекторной меди. В связи с этим при контакте ламели с более твердой щеткой возрастает механический износ ламели и повышается вероятность заволакивания межламельного пространства продуктами износа контактной пары «коллектор–щетка» [12].

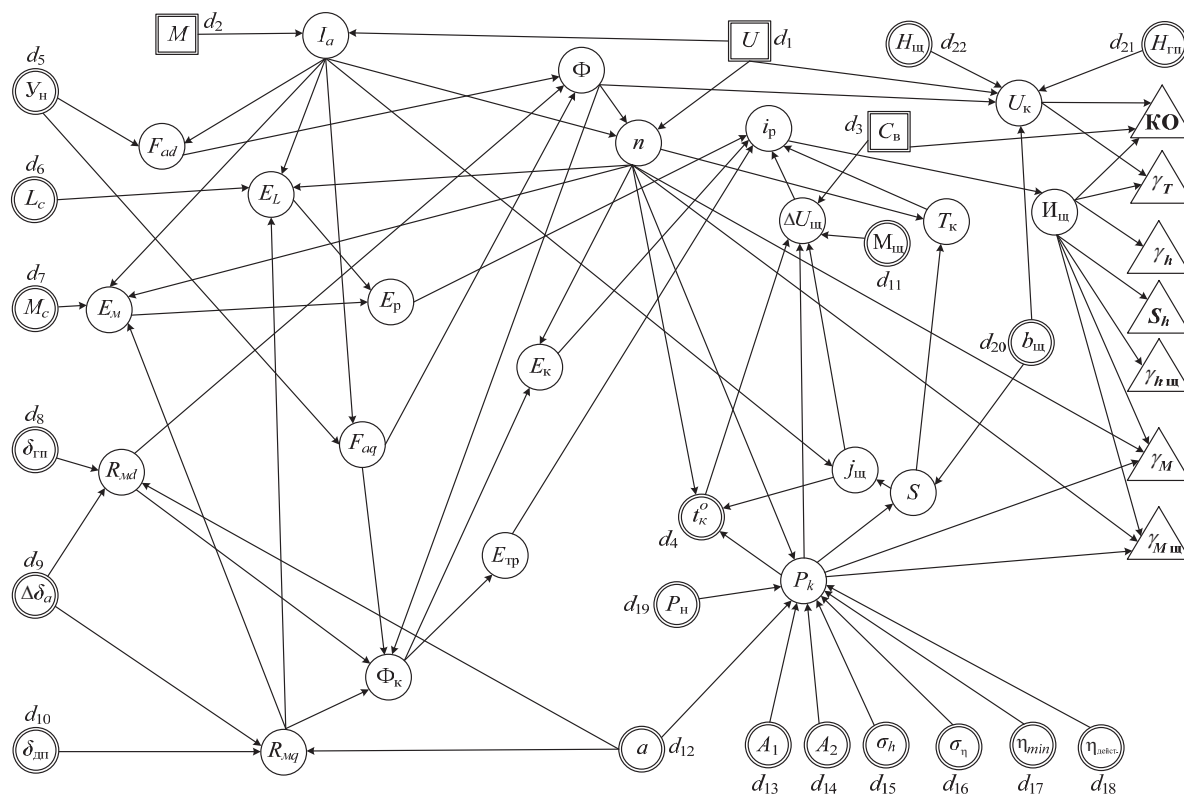


Рис. 1. Исходная граф-модель

Fig. 1. Original graph model

В уточненной граф-модели (рис. 1) учитываются диагностические параметры, отражающие влияние профиля коллектора на качество функционирования КЩУ ТЭД ($A_1, A_2, \sigma_h, \sigma_{\eta}, \dot{\eta}_{\min}, \dot{\eta}_{\text{дейст.}}$) [13], возможность возникновения кругового огня по коллектору при неблагоприятных потенциальных условиях, а также отражены причины возникновения электромеханического износа коллектора без учета (γ_m) и с учетом (γ_h, S_h) электродугового искрения и тепловые процессы, происходящие в КЩУ ТЭД (γ_t) [14–18].

В уточненной граф-модели КЩУ ТЭД используются следующие обозначения: I_a – ток якоря; U – напряжение на якоре; C_b – влажность; E_L – ЭДС самоиндукции; E_M – ЭДС взаимной индукции; E_k – ЭДС вращения; E_p – реактивная ЭДС; $E_{\text{тр}}$ – трансформаторная ЭДС; F_{ad} – МДС якоря по продольной оси; F_{aq} – МДС якоря по поперечной оси; R_{md} – магнитное сопротивление по продольной оси; R_{mq} – магнитное сопротивление по поперечной оси; Φ_k – магнитный поток в зоне коммутации; Φ – магнитный поток; n – частота вращения; $j_{\text{щ}}$ – плотность тока под щеткой; t_k^0 – температура коллектора; $\Delta U_{\text{щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте; P_k – давление в контакте «коллектор–щетка»; i_p – ток разрыва; T_k – период коммутации; $I_{\text{щ}}$ – искрение щеток; U_k – потенциальные условия на коллекторе; КО – круговой огонь; U_n – установка нейтрали; L_c – индуктивность секции якорной обмотки; M_c – взаимная индуктивность секции якорной обмотки; $\delta_{\text{тп}}$ – зазор под главными полюсами; $\Delta \delta_a$ – биение сердечника якоря; $\delta_{\text{щ}}$ – зазор под дополнительными полюсами; a – вибрация испытуемой машины; $M_{\text{щ}}$ – марка щетки; P_n – нажатие на щетку; $b_{\text{щ}}$ – ширина щеток и их раздвижка; $H_{\text{щ}}$ и $H_{\text{тп}}$ – несимметрия расположения щеток и главных полюсов; γ_t – тепловой износ коллектора; S – фактическая площадь контакта «коллектор–щетка»; γ_h – электромеханический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения; S_h – электромеханический износ коллектора по ширине пластины с учетом электродугового искрения; γ_m – электромеханический износ коллектора без учета электродугового искрения; $\gamma_{h\text{щ}}$ – электромеханический износ щетки; $\gamma_{m\text{щ}}$ – механический износ щетки. Дефекты: d_1 – отклонение напряжения на якоре машины от номинального значения; d_2 – отклонение момента на валу машины от нормы; d_3 – отклонение влажности воздуха от нормы; d_4 – отклонение температуры коллектора от нормы; d_5 – отклонение положения траверсы от геометрической нейтрали; d_6 – отклонение индуктивности секции якорной обмотки от нормы; d_7 – отклонение взаимной индуктивности секции якорной обмотки от нормы; d_8 – отклонение зазора под главными полюсами от нормы; d_9 – отклонение биения сердечника якоря от нормы; d_{10} – отклонение зазора под дополнительными полюсами от нормы; d_{11} – марка щетки не соответствует паспортным данным; d_{12} – уровень вибрации испытуемой машины превышает до-

пустимое значение; d_{13} – отклонение величины первой гармонической составляющей профиля коллектора от нормы; d_{14} – отклонение величины второй гармонической составляющей профиля коллектора от нормы; d_{15} – изменение среднего квадратического отклонения высоты профиля коллектора от нормы; d_{16} – изменение среднего квадратического отклонения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{17} – отклонение минимального значения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{18} – отклонение действующего значения второй производной профиля коллектора от нормы; d_{19} – уровень нажатия на щетку не соответствует норме; d_{20} – ширина щетки не соответствует норме; d_{21} – главные полюса расположены несимметрично; d_{22} – щетки расположены несимметрично.

Выявление соответствия дефектов, образующихся в результате эксплуатации КЩУ ТЭД, и диагностических параметров, характеризующих техническое состояние контактной пары «коллектор–щетка», основывается на применении двудольных графов. Одним из основных этапов формирования двудольного графа соответствия дефектов и диагностических параметров является построение рабочей граф-модели.

Первоначально производится упорядочение вершин граф-моделей методом экспертных оценок [19]. Затем каждому ребру граф-модели ставится в соответствие некоторая величина – вес ребра, характеризующий коэффициент связи между соответствующими параметрами. На основании весов ребер формируется исходная матрица смежности [20].

На основании исходной матрицы смежности сформирована матрица частных расстояний, с использованием которой определяются синдромы $D(e_i)$ и строится соответствующая таблица синдромов (таблица).

Таблица. Фрагмент таблицы синдромов

Table. Fragment of syndromes table

Параметр граф-модели Graph model parameter	Параметр граф-модели Graph model parameter							
	t_k^0	i_p	$\Delta U_{\text{щ}}$	P_k	$I_{\text{щ}}$	КО	S_h	γ_m
ΣC_{ik1}		5	3		6	8		
ΣC_{ik4}		5	3		6		8	
ΣC_{ik7}		5	3		6			9
ΣC_{p8}				1				3
ΣC_{p9}				1				3

В случае, если какая-либо строка матрицы частных расстояний имеет несколько ненулевых элементов, что означает разветвление маршрутов, то строятся подсиндромы $D^{(j)}(e_i)$ для каждого нулевого элемента, приравнивая поочередно остальные ненулевые элементы нулю. Результирующий синдром определяется следующим образом:

$$D(e_i) = \bigcup_j D^{(j)}(e_i).$$

Следующим шагом является построение компонентов достижимости $P(e)$ (на рис. 2 приведен компонент достижимости для параметра t_k^0). Для каждого $D(e_i)$ или $D^0(e_i)$ формировался маршрут, в котором последовательно отмечались все ненулевые элементы в порядке возрастания значений весов ребер ρ согласно методике, представленной в [20].

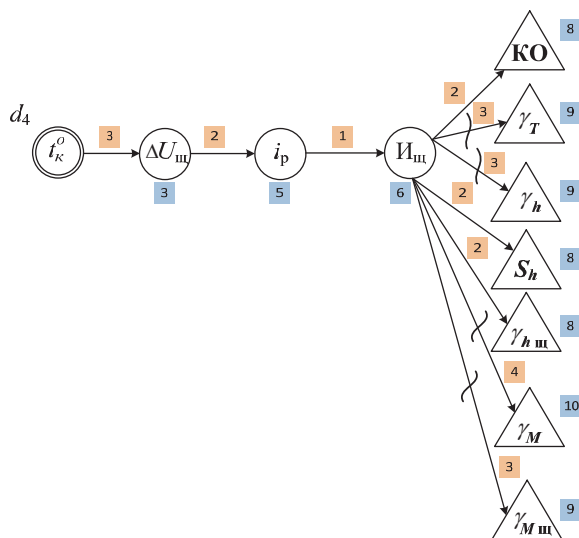


Рис. 2. Компонент достижимости параметра t_k^0

Fig. 2. Component of reachable vertex t_k^0

Критическое значение расстояния $\rho_{кр}=8$ определялось как медиана значений по гистограмме расстояний всех длин маршрутов.

Учитывая полученное значение $\rho_{кр}$, определены усеченные синдромы $\overline{D}(e)$ путем вычеркивания ненулевых элементов, значения которых превышают критическое значение. По полученным усеченным синдромам $\overline{D}(e)$ произведена коррекция состава синдромов $D(e_i)$. На рис. 2 усеченные компоненты достижимости отмечались волнистой линией [20].

Анализ усеченных компонентов достижимости $P(e)$ показал, что одним из параметров, оказывающих значительное влияние на внутренние параметры КЩУ ТЭД (КО, S_h , $\gamma_{h\text{ щ}}$), является температура коллектора t_k^0 .

Повышение температуры коллектора t_k^0 объясняется как механическими, так и электрическими причинами (рис. 3).

При повышении частоты вращения якоря n непосредственно возрастает частота появления ламели под щеткой. Рост температурной нагрузки обуславливается трением в контактной паре «коллектор–щетка», а также протеканием электрического тока через нее. Поскольку период, за который ламель совершает полный оборот, сокращается, коллекторная пластина не успевает охладиться до первоначальной температуры.

При увеличении контактного давления P_k возрастает сила трения в контактной паре «коллектор–щетка» и поверхностные слои коллекторной

меди нагреваются значительно. В случае уменьшения контактного давления P_k повышается вероятность отрыва щетки от коллектора и возникновения искрения, в связи с чем температура в контакте может повышаться. Изменение давления в контакте также влияет на реальную площадь взаимодействия контактной пары, изменяя плотность тока $j_{щ}$ в щеточном контакте.

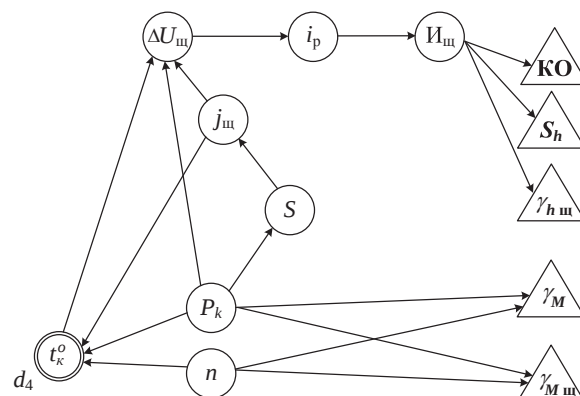


Рис. 3. Влияние температуры на внутренние параметры

Fig. 3. Temperature influence on internal parameters

Изменение температуры коллектора – один из факторов, определяющих падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$ и, как следствие, величину тока разрыва i_p . Величина тока разрыва непосредственно влияет на уровень искрения под щетками, таким образом определяет вероятность возникновения кругового огня по коллектору при выгорании одной или нескольких ламелей ($S_h \rightarrow \max$) и обуславливает рост электрохимической составляющей износа щетки $\gamma_{h\text{ щ}}$.

В результате объединения усеченных компонентов достижимости $P(e)$ построена рабочая граф-модель (рис. 4), отличающаяся от исходной отсутствием ребер $\langle E_{тр}, i_p \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_T \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_h \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$, разорванных во всех рассматриваемых маршрутах:

$$O = \overline{D(e_1)} \cup \overline{D(e_2)} \cup \dots \cup \overline{D(e_n)},$$

где $\overline{D(e_1)}$, $\overline{D(e_2)}$, $\overline{D(e_n)}$ – усеченные синдромы вершин e .

Рабочая граф-модель не содержит параметра γ_h , определяющего электрохимический износ коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения.

Анализ полученной граф-модели показывает, что разрыв ребер $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$, $\langle И_{щ}, \gamma_{M\text{ щ}} \rangle$ обусловлен преобладающим влиянием частоты вращения электродвигателя n и давления в щеточном контакте P_k над искрением под набегающим краем щетки при рассмотрении механического износа щеток $\gamma_{M\text{ щ}}$ и коллектора γ_M .

Физический смысл исключенного параметра γ_h – выгорание поверхности ламели по высоте под действием электродугового искрения под набегающим краем щетки. Необходимо отметить, что параметр γ_h учитывается в факторах γ_M и S_h следующим

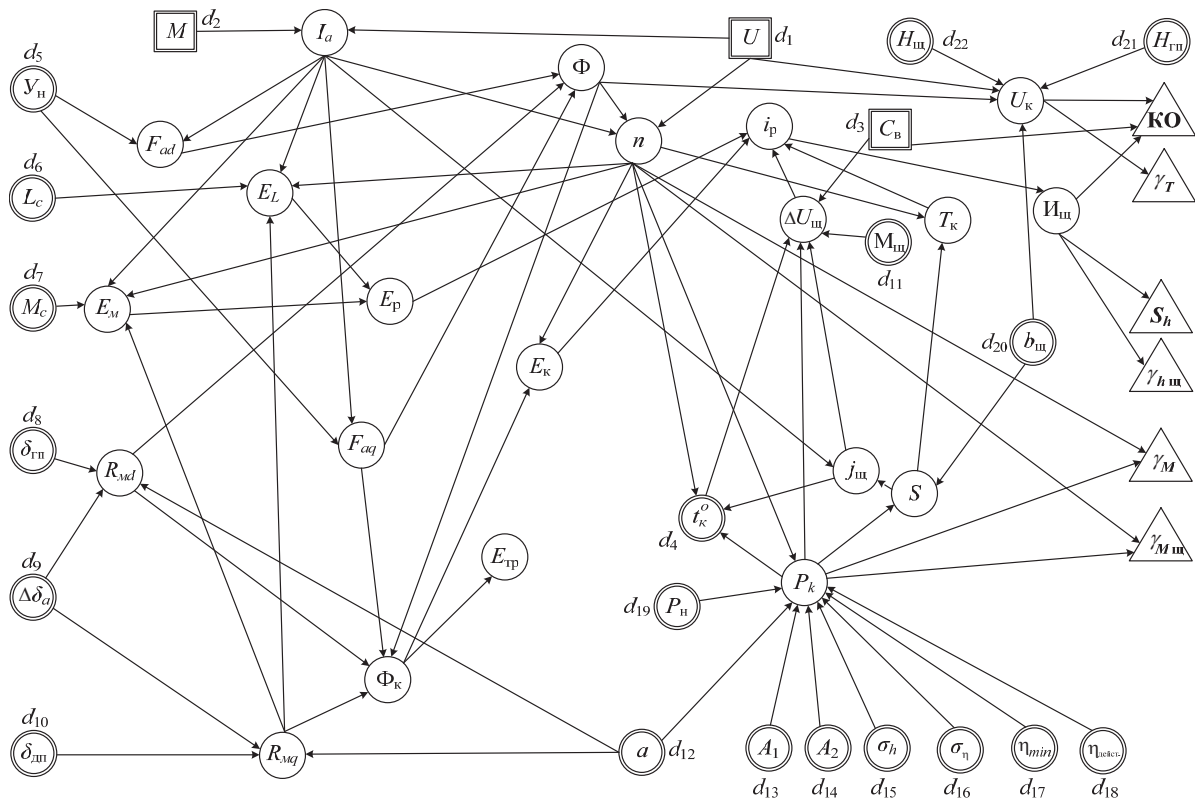


Рис. 4. Рабочая граф-модель КЩУ ТЭД

Fig. 4. Working graph model of commutator-brush unit of traction DC motor

образом: параметр γ_m характеризует электромеханический износ ламели без учета электродугового искрения, т. е. только от механического трения, параметр S_h – площадь поверхности ламели, подверженной электромеханическому износу от воздействия электродугового искрения. При износе поверхности ламели по ширине от воздействия электродугового искрения шероховатость пластины повышается, что увеличивает возможность возникновения искрения под набегающим краем щетки, и процесс повторится. Ввиду того, что γ_h носит локальный характер и не является определяющим для возникновения аварийных режимов работы двигателя, то приоритет в оценке износа следует отдавать параметру S_h . Величина γ_h , как правило, не превышает величины износа коллектора γ_m , поэтому может быть учтена в этих двух факторах.

Воздействие искрения на поверхность ламели увеличивает износ S_h , тем самым увеличивая шероховатость поверхности. Изменение шероховатости поверхности оказывает непосредственное влияние на механический износ ламели γ_m . Необходимо отметить, что значительные величины износов S_h и γ_h приводят к аварийному режиму работы ТЭД. Поскольку значительный износ γ_h возможно выявлять по другим параметрам до наступления аварийного режима работы, то необхо-

димостью в его оценке на этапе контроля работоспособности ТЭД отсутствует.

Заключение

Сформирована рабочая граф-модель КЩУ ТЭД как объекта преобразования электрической энергии в системах электроснабжения железнодорожного транспорта с учетом влияния тепловых факторов. Установлено, что искрение щеток электрической машины не оказывает существенного влияния на электромеханический износ коллектора без учета электродугового искрения и электромеханический износ щетки.

Обосновано исключение из рабочей граф-модели параметра электромеханического износа коллектора по высоте пластины с учетом электродугового искрения. Указанный вид износа учитывается в факторах электромеханического износа коллектора по ширине пластины, с учетом и без учета электродугового искрения.

Полученная рабочая граф-модель является основой для построения двудольного графа соответствия дефектов и диагностических параметров, определяющих техническое состояние и качество работы КЩУ ТЭД, а также определяет интенсивность электромеханического и теплового износа коллектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.
2. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
3. Бочаров В.И. Тяговые электродвигатели электровозов. – Новочеркасск: Агентство «Наутилус», 1998. – 672 с.
4. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: утверждена Правительством Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения: 07.11.2015).
5. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов: монография / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.В. Долгова, Д.А. Ахунов – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 198 с.
6. Харламов В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с.
7. Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. – Омск: Омский научный вестник, 2013. – 356 с.
8. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
9. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques / H. Henaoui, G.A. Capolino, M. Fernandez-Cabanas, F. Filippetti, C. Bruzzese, E. Strangas, R. Pucsa, M. Riera-Guasp, S. Hedayati-Kia // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2014. – V. 8. – № 2. – P. 31–42.
10. Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis / A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelm. – Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2012. – 272 p.
11. Харламов В.В., Шкодун П.К., Афонин А.П. Формирование эффективного множества диагностических параметров для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). – С. 69–75.
12. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода / В.Н. Лип, А.И. Кондратьев, Е.В. Муромцева, С.Н. Химухин // Дефектоскопия. – 2003. – № 12. – С. 32–38.
13. Ахунов Д.А. Повышение достоверности контроля профиля коллектора электрических машин вихрековым методом // Омский научный вестник. – 2012. – № 3 (113). – С. 223–226.
14. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
15. Glowacz Ad., Glowacz An., Glowacz Z. Recognition of thermal images of direct current motor with application of area perimeter vector and Bayes classifier // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – № 3. – P. 119–126.
16. Sebok M., Gutten M., Kucera M. Diagnostics of electric equipments by means of thermovision // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – V. 87 (10). – P. 313–317.
17. Щербатов В.В., Рапопорт О.Л., Цукублин А.Б. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 156–159.
18. Термографические исследования коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава / В.В. Харламов, П.К. Шкодун, А.В. Долгова, А.С. Хлопцов // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 44–50.
19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
20. Диагностирование на граф-моделях: на примерах авиационной и автомобильной техники / Я.Я. Осис, Я.А. Гельфандбейн, З.П. Маркович, Н.В. Новожилова. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.

Поступила 10.11.2015 г.

UDC 621.313.2

CREATING A GRAPH MODEL FOR THE DIAGNOSIS OF THE TRACTION MOTOR COMMUTATOR-BRUSH UNIT CONSIDERING THERMAL FACTORS

Viktor V. Kharlamov,Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: hvv-omgups@mail.ru**Pavel K. Shkodun,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: pkshk@mail.ru**Andrey S. Khloptsov,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: emoe@omgups.ru**Anna V. Dolgova,**Omsk State Transport University,
35, Karl Marks Avenue, Omsk, 644046, Russia. E-mail: lady_annie@mail.ru

Increasing of diagnosis accuracy of the technical condition and energy efficiency of the rolling stock traction motor is one of the current problems of the modern railway transport. Among the methods, which underlie a technical diagnostic system, the most promising is a semigraphical method, which displays the object in the space of diagnostic features and improves the accuracy of the diagnosis. The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase the diagnosis accuracy of the technical condition of a traction motor commutator-brush unit, because it influences the energy efficiency of electric energy conversion in the power supply systems of railway transport.

The main aim of the study: creation of the parent graph model matrix to generate a table of syndromes and produce graph model components of reachable vertex. The calculation of the critical distance to trim graph model components of reachable vertex and formation of the working graph model to control the working quality of the commutator-brush unit of traction DC motor function.

The methods used in the study are based on the application of the applied graph theory. The problem is solved based on the provisions of the electrical machines theory, using the methods of expert estimations, semigraphical method and methods of mathematical statistics. In the process of calculation and analysis of mathematical relationships the authors used Microsoft Excel 2010 and programming language Visual Basic for Applications.

The results. The authors refined a commutator-brush unit traction motor graph model. Based on the parent matrix we also formed a matrix of partial distances. Using the matrix partial distances data the syndromes were formed and graph model components of reachable vertex were produced. Critical distance is defined as the median of the value of the histogram distance routes of all lengths graph model. Based on the determined critical distance value the components of reachable vertex were truncated and the syndromes were corrected. The merger of truncated syndromes led to the formation of a working model.

Key words:

Diagnosis, commutator-brush unit, graph model, component of reachable vertex, syndrome, traction motor.

REFERENCES

1. GOST R 27.002–2009. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 27.002–2009. The reliability of the technique. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2010. 32 p.
2. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [The reliability of electrical machines]. Moscow, MEI Publ., 2006. 432 p.
3. Bocharov V.I. *Tyagovye elektrodvigateli elektrovozov* [Locomotive traction motors]. Novocherkassk, Nautilus Agency Publ., 1988. 672 p.
4. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda. Utverzhdena Pravitelstvom Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 № 877-p* [Development strategy of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Government of the Russian Federation on 17 June 2008, no. 877-p]. Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3997&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (accessed 7 November 2015).
5. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Dolgova A.V., Akhunov D.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley elektrovozov* [Improving the technology of diagnosing the technical condition of the collector-brush assembly of electric traction motors]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2015. 198 p.
6. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigateley i drugikh kollektornykh mashin postoyannogo toka* [Methods and means for diagnosing the technical condition of the traction motors collector-brush assembly and other collector DC machines]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2002. 233 p.
7. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka* [Optimization of the switching process in DC electric machines commutator]. Omsk, Omskiy Nauchnyy Vestnik Publ., 2013. 356 p.
8. Kholm R. *Elektricheskie kontakty* [Electric contacts]. Moscow, Foreign Literature Publ., 1961. 464 p.
9. Henaio H., Capolino G.A., Fernandez-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pucsa R., Riera-Guaspa M., Hedayati-Kia S. Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 31–42.

10. Toliyat A., Nandi S., Choi S., Meshgin-Kelm H. *Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2012. 272 p.
11. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Afonin A.P. Formirovanie effektivnogo mnozhestva diagnosticheskikh parametrov dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigately v usloviyakh neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov [The formation of an effective set of diagnostic parameters to control the technical condition of the collector-brush assembly traction motors are not identical in terms of operating cycles]. *Trans-Siberian Bulletin*, 2012, no. 4 (12), pp. 69–75.
12. Li V.N., Kondratyev A.I., Muromtseva E.V., Khimukhin S.N. Mekhanizmy razuprochneniya i razrusheniya kontaktnogo provo-da [Mechanisms of weakening and destruction of the contact wire]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, no. 12, pp. 32–38.
13. Akhunov D.A. Povyshenie dostovernosti kontrolya profilya kollektora elektricheskikh mashin vikhretkovym metodom [Increasing the reliability of reservoir profile control of electric motors by eddy current method]. *Omskiy Nauchnyy Vestnik*, 2012, no. 3 (113), pp. 223 – 226.
14. Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinakh* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1989. 239 p.
15. Glowacz Ad., Glowacz An., Glowacz Z. Recognition of thermal images of direct current motor with application of area perimeter vector and Bayes classifier. *Measurement Science Review*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 119–126.
16. Sebok M., Gutten M., Kucera M. Diagnostics of electric equipments by means of thermovision. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2011, vol. 87 (10), pp. 313–317.
17. Shcherbatov V.V., Rapoport O.L., Tsukublin A.B. Modelirovanie teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa [Modeling of the thermal state of the traction motor to predict the resource]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, no. 7, pp. 156–159.
18. Kharlamov V.V., Shkodun P.K., Dolgova A.V., Khloptsov A.S. Termograficheskie issledovaniya kollektorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava [Thermographic study of collector-brush assembly traction motors of rolling stock]. *The Trans-Siberian Bulletin*, 2014, no. 3 (19), pp. 44–50.
19. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 544 p.
20. Osis Ya.Ya., Gelfandbeyn Ja.A., Markovich Z.P., Novozhilova N.V. *Diagnostirovanie na graf-modelyakh: na primerakh aviatsionnoy i avtomobilnoy tekhniki* [Diagnosis on graph models: the examples of aviation and automotive technology]. Moscow, Transport Publ., 1991. 244 p.

Received: 10 November 2015.

УДК: 533.17; 533.9.072; 533.92

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Мышкин Вячеслав Фёдорович,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики
Физико-технического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: gos100@tpu.ru

Хан Валерий Алексеевич,

доктор технических наук, доцент кафедры технической физики
Физико-технического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30; ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы
им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.
E-mail: nt.centre@mail.ru

Беспала Евгений Владимирович,

аспирант кафедры технической физики Физико-технического института
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: bespala90@tpu.ru

Тихи Милан,

PhD-профессор кафедры поверхностей и физики плазмы факультета
математики и физики Карловского университета, Чешская Республика,
11000, Прага 8, В Холесовичках, 2. E-mail: tichy@nbox.troja.mff.cuni.cz

Ижойкин Дмитрий Александрович,

кандидат физико-математических наук, начальник информационно-
аналитического отдела Томского государственного архитектурно-строительного
университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: info@tsuab.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации геометрии плазмохимического реактора для увеличения изотопных эффектов.

Цель работы: поиск оптимальной геометрии плазмохимического реактора, обеспечивающего локализацию высокотемпературной части плазменного потока в осевой области для снижения эффекта обратной диффузии, приводящей к выравниванию изотопной концентрации.

Методы исследования: расчеты и оптимизация газовых потоков внутри плазмохимического реактора путем решения нестационарных уравнений Навье–Стокса и Фурье методом конечно-разностных элементов при помощи пакета COMSOL.

Результаты. Приводятся результаты исследований по оптимизации процесса спиновой сепарации изотопов углерода в низкотемпературной неравновесной плазме, помещенной в постоянное магнитное поле. Проведен анализ процессов, происходящих внутри плазмохимического реактора постоянного диаметра. Показано, что уменьшение изотопных эффектов связано с окислением дисперсной фазы, образующейся на стенках реактора. Предложена конструкция реактора, изолирующая высокотемпературный плазменный поток от стенок камеры. Проведен расчёт газовых потоков внутри плазмохимического реактора с периодически установленными диафрагмами. Показано, что для контрагирования высокотемпературного газового потока в центральной области и изолирования его от стенок плазменного реактора можно использовать тонкие диафрагмы из жаростойкого материала. Из результатов расчетов видно, что диафрагмы конической формы более эффективны, чем плоские. Установлено, что использование плазменного реактора с диафрагмами для разделения газовой и дисперсной фаз эффективно при расходах плазмообразующего газа, превышающего критическое значение. При этом в значительной мере сохраняется максимально возможный изотопный эффект, возникающий при плазменном неполном окислении паров углерода в магнитном поле.

Ключевые слова:

Плазменный поток, реактор, изотоп углерода, окисление, сажа.

Введение

Плазменные технологии являются одним из перспективных способов переработки газообразного и твердого сырья [1–4]. В низкотемпературной плазме степень ионизации меньше 1 %, а скорости

протекания химических реакций значительно выше, чем при комнатных температурах. Неравновесность высокочастотной газоразрядной плазмы позволяет осуществлять физико-химические процессы, невозможные в иных условиях.

Нами исследуется изотопный эффект при неполном окислении углерода в низкотемпературной плазме высокочастотного факельного разряда, находящегося во внешнем постоянном магнитном поле [5–7]. Целевой эффект связан с разделением ядер углерода с разными спинами между газовой и конденсированной фазами, подобно магнитному изотопному эффекту в жидкости.

При продвижении плазменного потока вдоль оси реактора непрореагировавший углерод выносятся на периферийные, более холодные области разрядного канала и образует дисперсную фазу. При этом во внешнем постоянном магнитном поле содержание ^{13}C в газовом и дисперсном продуктах плазменных процессов различается.

В условиях низкотемпературной плазмы изотопный эффект может уменьшиться относительно расчетного значения из-за вероятности окисления образующегося дисперсного углерода при его движении к стенкам плазмохимического реактора через диффузную оболочку разряда. Также возможно окисление образующейся на стенках реактора сажи при контакте стенки с высокотемпературным потоком, содержащим кислород. Поэтому необходимо использовать методы быстрого разделения газовой и дисперсной фаз, образующихся в плазменных процессах [8]. Это возможно путем ограничения высокотемпературной области разряда в осевой части плазмохимического реактора.

Известен метод локализации плазменного канала в осевой части путем тангенциальной подачи плазмообразующей смеси. Однако эффективность сжигания плазменного канала, при тангенциальной подаче плазмообразующей смеси, уменьшается при малых расходах газа.

Цель исследования – поиск оптимальной геометрии плазмохимического реактора, обеспечивающего локализацию высокотемпературной части плазменного потока в осевой области.

Физико-химические процессы в низкотемпературной плазме

Экспериментальные исследования связаны с формированием потока низкотемпературной плазмы в виде факельного разряда с графитового электрода при помощи высокочастотного генератора. В нижнюю часть кварцевого плазмохимического реактора ($d=0,1$ м, $h=0,6$ м) тангенциально подается смесь аргона, гелия и кислорода. Задаваемое для экспериментов содержание кислорода 0,001 мольных долей в плазмообразующей смеси недостаточно для полного окисления паров углерода, образующихся при испарении графитового электрода. В плазмообразующей смеси также возможны незначительные примеси азота. Часть плазмообразующего газа формирует плазменный поток диаметром не более 1 см, в котором происходит неполное окисление паров атомарного углерода. Часть канала плазмохимического реактора занята диффузной оболочкой разряда. Между диффузной оболочкой разряда и стенками реактора образуется

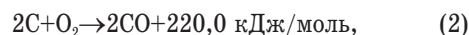
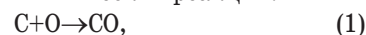
поток попутного нагретого газа, температура которого определяет потери на нагрев стенок.

В ВЧ-факельном разряде нагрев плазмообразующей смеси осуществляется электронным ударом. Первый возбужденный электронный уровень имеет следующие значения для атомов: аргона – $93143,76 \text{ см}^{-1}$ [9], кислорода – $15867,86 \text{ см}^{-1}$ [10], углерода – $10192,66 \text{ см}^{-1}$ [11], азота – $19224,46 \text{ см}^{-1}$ [12]. Указанные элементы имеют электронные уровни с энергиями в диапазоне:

- углерод – $60333,43\text{--}78731,28 \text{ см}^{-1}$;
- кислород – $73768,20\text{--}97420,99 \text{ см}^{-1}$;
- аргон – $104102,10\text{--}114975,02 \text{ см}^{-1}$;
- азот – $83284,07\text{--}104881,35 \text{ см}^{-1}$.

Из-за преобладающего содержания в плазмообразующей смеси аргона основным механизмом нагрева плазмы является возбуждение электронных уровней аргона электронным ударом [13–15]. Нагрев атомов углерода и молекул кислорода происходит в основном при их столкновении с возбужденными атомами аргона.

В низкотемпературной плазме окисление паров углерода возможно в результате протекания следующих газофазных химических реакций:



Количество атомарного кислорода в плазме при температурах менее 2500°C не превышает нескольких процентов. Поэтому вкладом реакции (1) в энергию, выделяющуюся при окислении, можно пренебречь. При недостатке кислорода реакции (3) не наблюдается. По оценкам, энергия, выделяющаяся в результате реакции (2), с учетом всего вводимого в плазменный поток углерода, не превышает 5 Дж. Это значительно меньше 4 кДж/с электроэнергии, потребляемой ВЧ-генератором. Поэтому влиянием химических реакций на баланс энергии можно пренебречь.

Химические реакции (1) и (2) являются радикальными, поэтому во внешнем магнитном поле может проявляться изотопный эффект. Скорость образования оксида углерода в смеси его изотопов описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{d[\text{CO}(t)]}{dt} = k_1[\text{C}(t)][\text{O}(t)] + k_2[\text{C}(t)][\text{O}_2(t)], \quad (4)$$

где $[\text{CO}(t)]$ – концентрация оксида углерода; $[\text{C}(t)]$ – концентрация атомарного углерода; $[\text{O}(t)]$ – концентрация атомарного кислорода; $[\text{O}_2(t)]$ – концентрация молекулярного кислорода; $k_1(k_2)$ – константа окисления углерода атомарным (молекулярным) кислородом.

Отсутствие в литературе констант скоростей окисления для изотопов углерода не позволяет использовать уравнение (4) для расчета концентрации ^{13}CO при различных условиях. Также следует учитывать то, что при температурах менее 2500°C диссоциация молекулярного кислорода незначительна.

Моделирование и результаты расчета параметров газового потока

Для оптимизации условий формирования дисперсной фазы рассчитывали газодинамику плазменного потока в плазмохимическом реакторе. Ограничение области горячего газового потока от стенок реактора осуществлялось диафрагмами, формирующими открытые к центральной области реактора полости, на стенках которых оседает конденсированная фаза. При этом унос или окисление сажи со стенок реактора остаточным окислителем становится несущественным.

Предполагалось, что в результате локализации потока вдоль канала разряда нагревание пристеночной области происходит лишь посредством теплопроводности в радиальном направлении и излучения. Поэтому температура стенок плазмохимического реактора в области между диафрагмами увеличивается незначительно.

При моделировании необходимы параметры плазмообразующей смеси при температурах 2000–4000 °С. Динамическую вязкость для смеси плазмообразующих газов рассчитывали с помощью соотношения Чепмена–Энскога [16]:

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \left[x_i \mu_i / \sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij} \right], \quad (6)$$

где x_i – молярная доля i -газа; μ_i – динамическая вязкость i -газа; Φ_{ij} – коэффициент, определяемый как

$$\Phi_{ij} = (\mu_i)^{0,5} (\mu_j)^{-0,5}. \quad (7)$$

Для высокочастотного факельного разряда температура в приосевой области плазменной струи не превышает 4000 °С [17]. Поэтому динамическая вязкость для смеси Ar:He=1:1 принята 0,074 Па·с. При этом считалось, что расход плазмообразующего газа не превышает 8 л/мин, а скорость подачи газа 1 м/с. Предполагалось, что газообразные продукты плазмохимической реакции покидают реактор при атмосферном давлении.

Число Рейнольдса для исследуемого газового потока не превышает 1500. Поэтому решали уравнение Навье–Стокса для ламинарного режима движения газового потока [18, 19]:

$$\rho(\vec{u}\nabla)\vec{u} = \nabla[-p\vec{I} + \vec{\tau}] + \vec{F}, \quad (8)$$

$$\nabla(\rho\vec{u}) = 0, \quad (9)$$

где ρ – плотность газовой смеси; p – давление; $\vec{I}$ – единичный тензор; $\vec{u}$ – вектор скорости газового потока; ∇ – оператор набла; $\vec{F}$ – вектор массовых сил; $\vec{\tau}$ – тензор вязких напряжений [20]:

$$\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j}, \quad (10)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}, \quad (11)$$

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}, \quad (12)$$

$$\vec{\tau} = \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla\vec{u})\vec{I}, \quad (13)$$

где μ – динамическая вязкость газовой смеси; T – символ транспонирования.

В связи с вертикальной ориентацией реактора для упрощения решения примем для начального условия решения уравнения Навье–Стокса $u_x=0$, тогда его можно записать как

$$\vec{u} = \vec{u}_0 = j\vec{u}_y, \quad (14)$$

где u_x , u_0 , u_y – проекции вектора скорости газового потока на соответствующие оси.

Граничным условием для стенок реактора является прилипание потока газа к стенкам:

$$\vec{u} = 0. \quad (15)$$

В расчетах принимали, что высокотемпературный газ, находящийся при атмосферном давлении, подается снизу вверх через центральное отверстие диаметром 1 см, располагаемое вместо цилиндрического электрода, а расход плазмообразующего газа обеспечивает ламинарный поток со скоростью 1,8 м/с по оси плазменного канала. Температуру считали равной 3250 °С по всей длине плазмохимического реактора, как средней величины потока с некоторым распределением температуры при атмосферном давлении. Деформацией лопастей диафрагм и стенок реактора пренебрегали.

На рис. 1 приведены расчетные линии равных скоростей потока газа в цилиндрическом реакторе (а) и в цилиндрическом реакторе с диафрагмами (б, в). Диаметр центральных отверстий диафрагм – 2 см. Результаты расчетов показывают, что диафрагмы оказывают существенное влияние на диаметр высокотемпературной части газового потока на участке между диафрагмами. При использовании конических диафрагм газовый поток в периферийных областях реактора еще меньше. Из графиков на рис. 1, б–г видно, что увеличение угла наклона диафрагмы, так же как и уменьшение диаметра отверстия, способствует большему концентрированию потока газа в области между диафрагмами. При расчетах охлаждение газового потока вдоль его оси не учитывали.

На рис. 2, а приведены расчетные графики распределения скоростей плазменного потока по радиусу цилиндрического реактора без дополнительных конструктивных деталей. Размеры приведены в [см]. В области плазменного реактора, между каналом факельного разряда ($r_1=1$ см) и стенками ($r_2=5$ см), наблюдается значительное изменение скоростей потока. В сечении реактора, находящемся на расстоянии 2 см от высоковольтного электрода, скорость потока в его центральной части достигает 0,55 м/с. Для цилиндрического реактора наблюдается расширение потока движущегося газа (рис. 1, а и 2, а).

Толщина диафрагмы считалась бесконечно малой. Результаты расчетов распределения величины скорости потока газа в зависимости от угла наклона конической диафрагмы показывают, что

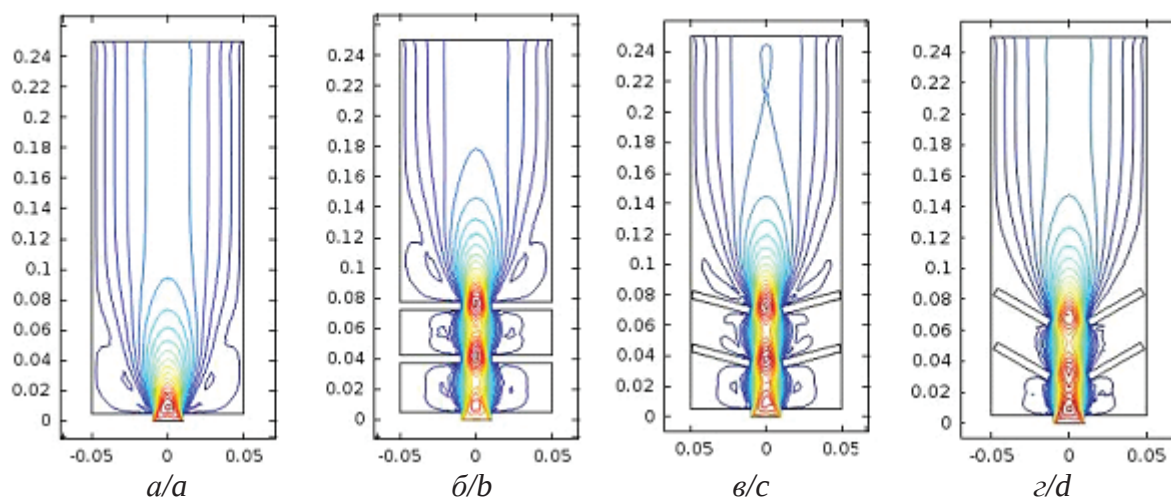


Рис. 1. Линии скоростей газового потока ($T=3250\text{ }^{\circ}\text{C}$) в осевом сечении плазменного реактора: а – без диафрагм; б – с наклоном диафрагм – 0° ; в – 15° ; г – 30°

Fig. 1. Lines of gas flow velocity ($T=3250\text{ }^{\circ}\text{C}$) in the axial section of the plasma reactor: а – without diaphragms; б – slope of the diaphragms – 0° ; в – 15° ; г – 30°

диафрагмы с центральным цилиндрическим отверстием ограничивают область потока горячего газа (см. рис. 1, б–г и 2, б). При этом профили скоростей потока незначительно изменяются вдоль оси реактора в области установки диафрагмы, а область потока горячего газа ограничена цилиндрической поверхностью радиусом 2 см, равной диаметру диафрагмы. Диафрагмы предотвращают контакт горячего газа со стенками. На расстоянии 10 см от высоковольтного электрода, где отсутствуют диафрагмы, высокотемпературный газовый поток расширяется и занимает практически всё сечение плазменного реактора.

Экспериментально, из относительных интенсивностей линий свечения аргона, было определено распределение газовой температуры разрядного канала в плазмохимическом реакторе в форме полого цилиндра. При этом факельный разряд возбуждался в реакторе из кварцевого стекла с внутренним диаметром 48 мм с помощью ВЧ-генератора мощностью 4 кВт (частота – 27 МГц). Из экс-

периментальных данных, полученных на расстоянии от высоковольтного электрода 3–40 см, распределение температуры T вдоль продольной оси z плазменного канала было аппроксимировано с помощью полиномов 3-го порядка в виде функции

$$T(z) = 4057,72 - 57,11z + 1,55z^2 - 0,02z^3. \quad (16)$$

Изменение температуры вдоль плазменного канала было использовано при расчетах распределения скоростей вдоль оси плазмохимического реактора. При этом совместно решали уравнения (8), (9) и стационарное уравнение теплопереноса (17):

$$\rho C_p \vec{u} \nabla T = \nabla T (k \nabla T), \quad (17)$$

где T – температура газового потока, $\vec{u}$ – вектор скорости газового потока, получаемый из решения уравнения Навье–Стокса; k – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; ρ – плотность газового потока.

Для уравнения (17) использовали следующие граничные условия:

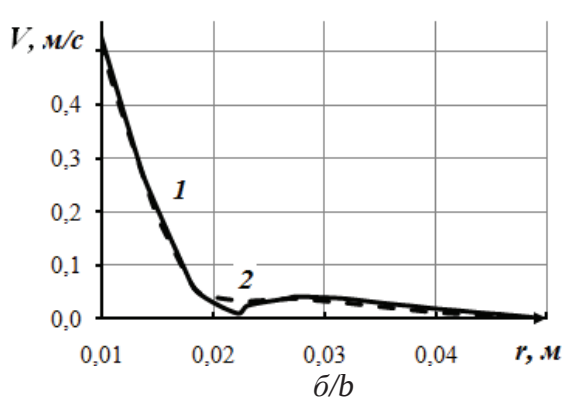
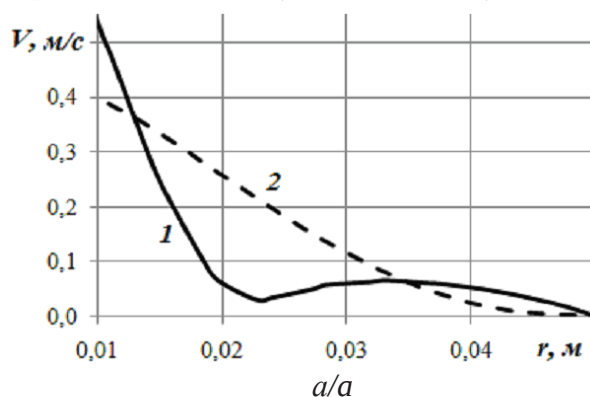


Рис. 2. Распределение скорости плазменного потока ($T=3250\text{ }^{\circ}\text{C}$) по радиусу реактора для сечений от высоковольтного электрода: а – цилиндрический реактор; б – цилиндрический реактор с диафрагмами; 1 – 2 см, 2 – 6 см

Fig. 2. Plasma flow velocity distribution ($T=3250\text{ }^{\circ}\text{C}$) along the radius of the reactor for the sections of the high-voltage electrode: а – cylindrical reactor; б – cylindrical reactor with diaphragms; 1 – 2 cm, 2 – 6 cm

$$T|_{r=0} = T(z). \quad (18)$$

$$T|_{r=R} = T_0. \quad (19)$$

На рис. 3 приведены графики распределения по радиусу реактора скоростей высокотемпературного газа в сечении, расположенном посередине между двумя смежными плоскими диафрагмами (6 см от электрода), при экспериментально определяемом значении температуры. Видно, что уменьшение диаметра отверстий диафрагм приводит к значительному контрагированию высокотемпературного потока в осевой области [21]. Также наблюдается значительное увеличение абсолютного значения скорости в приосевой области реактора. Это способствует уменьшению времени плазменной обработки сырья и увеличению скорости закалки газовых продуктов плазмохимической реакции на выходе из реактора из-за сохранения высоких значений температуры и скорости в осевой области реактора.

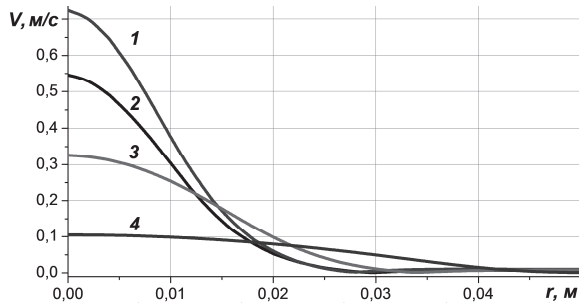


Рис. 3. Распределение скоростей плазменного потока ($T=3720^\circ\text{C}$) по радиусу реактора при диаметре отверстий диафрагм: 1 – 0,5 см; 2 – 1 см; 3 – 2 см; 4 – 3 см

Fig. 3. Plasma flow velocity distribution ($T=3720^\circ\text{C}$) along the radius of the reactor with the diameter of aperture of the diaphragm: 1 – 0.5 cm; 2 – 1 cm; 3 – 2 cm; 4 – 3 cm

Для дальнейших расчетов также считали, что температура газовой смеси на входе в плазмохимический реактор, стенки которого с внешней стороны охлаждаются воздушным потоком температурой 25°C , равна 4000°C . Распределение температуры вдоль оси потока задавали уравнением (16).

На распределение скорости высокотемпературного потока влияет способ ввода плазмообразующего газа внутрь плазмохимического реактора. Так, в работе [22] показано, что тангенциальная подача газа приводит к его поджатию в осевой области и стабилизации газового потока. При этом направление движения газа будет зависеть от разности давлений на концах реактора и радиуса закрутки потока. При осевой подаче плазмообразующего газа профиль скорости высокотемпературного потока существенно зависит от диаметра входного отверстия. На рис. 4 представлена зависимость скорости газового потока по радиусу реактора в сечении, расположенном посередине между двумя смежными плоскими диафрагмами, при

различном диаметре входного отверстия. При этом диаметр отверстий диафрагм составлял 2 см при длине реактора 30 см. Из графиков видно, что с увеличением радиуса входного отверстия уменьшается степень локализации газового потока. При этом скорость газа в пристеночной области фактически не изменяется. Поэтому контрагирование потока высокотемпературного газа в основном определяется геометрией и местом расположения диафрагм.

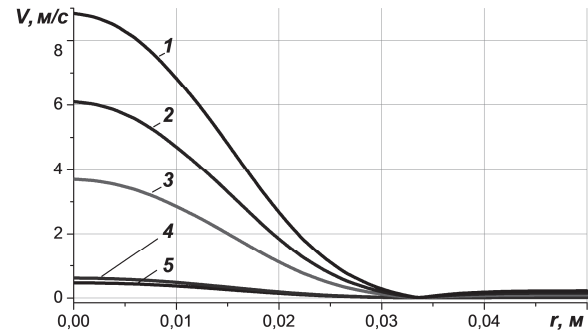


Рис. 4. Распределение скорости плазменного потока (с начальной температурой 4000°C) по радиусу реактора на расстоянии 6 см от входного отверстия диаметром: 1 – 0,5 см; 2 – 1 см; 3 – 3 см; 4 – 4 см; 5 – 5 см

Fig. 4. Plasma flow velocity distribution (initial temperature 4000°C) along the radius of the reactor at a distance of 6 cm from the inlet, in diameter: 1 – 0.5 cm; 2 – 1 cm; 3 – 3 cm; 4 – 4 cm; 5 – 5 cm

Для оценки времени нагрева стенок реактора между диафрагмами при ряде консервативных допущений совместно решали нестационарное уравнение Навье–Стокса и уравнение теплопроводности [23, 24]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \nabla T = \nabla T (k \nabla T), \quad (20)$$

где T – температура газового потока; $\vec{u}$ – вектор скорости газового потока, получаемый из решения нестационарного уравнения Навье–Стокса; k – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; ρ – плотность газового потока; t – время.

При расчете течения высокотемпературной газовой смеси показатель адиабаты газовой смеси вычисляли по формуле [25]

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{v_1 C_{p1} + v_2 C_{p2}}{v_1 C_{v1} + v_2 C_{v2}}, \quad (21)$$

где C_v – удельная изохорная теплоемкость; V_1, V_2 – объемные доли 1 и 2 газов; C_{p1}, C_{p2} – удельные изобарные теплоемкости 1 и 2 газов; C_{v1}, C_{v2} – удельные изохорные теплоемкости 1 и 2 газов.

Динамическую вязкость плазмообразующего газа для диапазона температур $2000\text{--}4000^\circ\text{C}$ рассчитывали по формуле Сазерленда [26]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (22)$$

где μ_0 – динамическая вязкость газовой смеси при температуре T_0 , получаемая из решения уравнения (6); C – постоянная Сазерленда.

Графики зависимости от времени температуры газового потока в пристеночном слое между диафрагмами, при диаметре входного отверстия 1 см, приведены на рис. 5. При этом графики соответствуют разным расходам плазмообразующего газа. На рисунке видно, что с увеличением скорости подачи плазмообразующего газа возрастает максимальная температура газового потока в пристеночном слое и увеличивается время установления максимальной температуры. Так, при скорости подачи газа 10 м/с стенки реактора нагреваются до температуры 590 °С за время порядка 2,5 с.

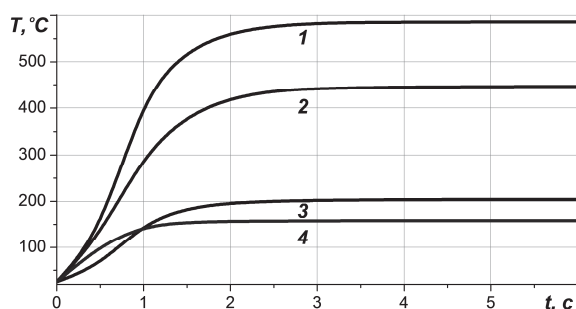


Рис. 5. Изменение температуры в пристеночном слое на расстоянии 6 см от входного отверстия при среднемассовой температуре плазмы менее 4000 °С и скорости потока плазмы: 1 – 10 м/с; 2 – 5 м/с; 3 – 1 м/с; 4 – 0,1 м/с

Fig. 5. Temperature change in the boundary layer at a distance of 6 cm from the inlet at average plasma temperature less than 4000 °C and velocity of the plasma: 1 – 10 m/s; 2 – 5 m/s; 3 – 1 m/s; 4 – 0.1 m/s

Из решения нестационарного уравнения теплопроводности видно, что при среднемассовой температуре плазмы менее чем 4000 °С и скорости подачи плазмообразующего газа не более 10 м/с температура в пристеночной области между диафрагма-

ми не превышает температуру испарения углерода. Однако это имеет место лишь в том случае, если стенки плазмохимического реактора охлаждаются потоком воздуха при комнатной температуре 25 °С.

Заключение

Для контрагирования высокотемпературного газового потока в центральной области и изолирования его от стенок плазменного реактора, при расходах плазмообразующей смеси 5, 8, 10 л/мин, можно использовать тонкие диафрагмы из жаростойкого материала. При этом в области формирования плазменного потока – в реакторе с диафрагмами – не происходит контакта высокотемпературного газа со стенками. Расчеты показывают, что угол наклона диафрагм также оказывает влияние на распределение векторов скорости в реакторе.

Уменьшение диаметра отверстия диафрагмы способствует контрагированию потока газа, поддержанию заданных значений скорости и температуры плазменного потока. При этом достигаются лучшие показатели плазмохимической технологии. Реализуемая при этом высокая скорость закалки продуктов плазменных процессов позволяет сохранять расчетные значения концентраций продуктов плазмохимических процессов.

Вязкость газовой смеси, влияющая на газодинамические показатели потока, зависит от температуры. Поэтому при разработке конструкции и выборе геометрических размеров плазменного реактора следует учитывать давление и расход плазмообразующего газа, определяющие температуру и скорость высокотемпературного газового потока при заданной мощности высокочастотного генератора.

При использовании диафрагм в плазменном реакторе с малым расходом плазмообразующей смеси в значительной мере сохраняется максимально возможный изотопный эффект, возникающий в плазменных процессах в магнитном поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mei D., Zhu X., Wu C. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: understanding the synergistic effect of plasma-catalysis // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2016. – V. 182. – P. 525–532.
- Surface modification of polyester fabric with plasma pretreatment and carbon nanotube coating for antistatic property improvement / C.X. Wang, J.C. Lv, Y. Ren, J.Y. Chen, Q.Q. Zhou, Z.Q. Lu, D.W. Gao, L.M. Jin // *Applied Surface Science*. – 2015. – V. 359. – P. 196–203.
- Semboshi S., Iwase A., Takasugi T. Surface hardening of age-hardenable Cu–Ti alloy by plasma carburization // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – V. 283. – P. 262–267.
- Schiavon M., Scapinello M., Tosi P. Potential of non-thermal plasmas for helping the biodegradation of volatile organic compounds (VOCs) released by waste management plants // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – V. 104. – P. 211–219.
- Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field / V.F. Myshkin, V.A. Khan, V.G. Plekhanov, D.A. Izoykin, E.V. Bespala // *Russian Physics Journal*. – 2015. – V. 57. – № 10. – P. 1442–1448.
- Isotope effects of plasma chemical carbon oxidation in a magnetic field / V.F. Myshkin, V.A. Khan, D.A. Izhoikin, I.A. Ushakov // *Natural Science*. – 2013. – V. 5. – № 1. – P. 57–61.
- Physical and chemical processes research of isotope separation in plasma under magnetic field / V.F. Myshkin, D.A. Izhoikin, I.A. Ushakov, V.F. Shvetsov // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 880. – P. 128–133.
- Electrical aspects of flame quenching / F.J. Weinberg, D. Dunn-Rankin, F.B. Carleton, S. Karnani, C. Markides, M. Zhai // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2013. – V. 34. – № 2. – P. 3295–3301.
- Emission and absorption spectroscopy study of Ar excited states in 13.56 MHz argon plasma operating at sub-atmospheric to atmospheric pressure / L.Li. Nikiforov, N. Britun, R. Shyders, C. Leys // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2015. – V. 107. – P. 75–85.
- Roles of singlet oxygen and triplet excited state of dissolved organic matter formed by different organic matters in bacteriophage

- MS2 inactivation / S.L. Rosado-Lausell, H. Wang, L. Gutierrez, O.C. Romero-Maraccini, Xi-Zhi Niu, K.Y. Gin, J.P. Croue, T.H. Nguyen // *Water Research*. – 2013. – V. 47. – № 14. – P. 4869–4879.
11. Electronic structure of hydrogenated carbon nanotubes studied by core level spectroscopy / M. Brzezinskaya, V. Shmatko, G. Yalovega, A. Krestinin, I. Bashkin, E. Bogoslavskaja // *Related Phenomena*. – 2014. – V. 196. – P. 99–103.
12. Yench A.J., Ellis K., King G.C. High-resolution threshold photoelectron and photoion spectroscopy of molecular nitrogen in the 15.0–52.7 eV photon energy range // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. – 2014. – V. 195. – P. 160–173.
13. Ag K-shell ionization by electron impact: new cross-section measurements between 50 and 100 keV and review of previous experimental data / V.R. Vanin, M.V. Manso Guevara, N.L. Maidana, M.N. Martins, J.M. Fernandez-Varea // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2016. – V. 119. – P. 14–23.
14. Yan B., Caflisch R.E., Barekat F. Analysis and simulation for a model of electron impact excitation/deexcitation and ionization/recombination // *Journal of Computational Physics*. – 2015. – V. 299. – P. 747–786.
15. Guerra M., Parente F., Santos J.P. Electron impact ionization cross sections of several ionization stages of Kr, Ar and Fe // *International Journal of Mass Spectrometry*. – 2013. – V. 348. – P. 1–8.
16. Глумов Д.Н., Стрекалов А.В. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2011. – № 1. – С. 194–209. URL: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Glumov_1.pdf (дата обращения: 20.11.2015).
17. Carbon and oxygen atoms distribution along low-temperature plasma torch in the magnetic field / V.F. Myshkin, D.A. Izhoikin, E.V. Bepala, I.A. Ushakov // *Adv. Mater. Res.* – 2015. – № 1084. – P. 93–96.
18. Ладженская О.А. Исследование уравнения Навье–Стокса в случае стационарного движения несжимаемой жидкости // *Успехи математических наук*. – 1959. – Т. XIV. – Вып. 3. – С. 75–97.
19. Wei D. Regularity criterion to the axially symmetric Navier–Stokes equations // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. – 2016. – V. 435. – P. 402–413.
20. Dahai L., Chao Y., Xiaoyong W. Computational study of supersonic turbulent-separated flows using partially averaged Navier–Stokes method // *Acta Astronautica*. – 2015. – V. 107. – P. 234–246.
21. Koike K., Ono N. Light intensity analysis of plasma jet constriction with applied magnetic field // *Vacuum*. – 2008. – V. 83. – № 1. – P. 25–28.
22. Беспала Е.В., Давыдов Е.Ю. Моделирование газовых потоков при плазменной сепарации изотопов углерода в магнитном поле // *Сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике»*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 34–38.
23. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
24. An inverse time-dependent source problem for the heat equation with a non-classical boundary condition / A. Hazanee, D. Lesnic, M.I. Ismailov, N.B. Kerimov // *Applied Mathematical Modeling*. – 2015. – V. 39. – № 20. – P. 6258–6272.
25. Development and validation of a coupled Navier–Stokes / K. Farber, P. Farber, J. Gabel, S. Krick, J. Reitz, P. Ueberholz // *Applied Mathematics and Computation*. – 2016. – V. 272. – № 1. – P. 648–656.
26. Sebastian G., Shine S.R. Natural convection from horizontal heated cylinder with and without horizontal confinement // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 82. – P. 325–334.

Поступила 30.11.2015 г.

UDC: 533.17; 533.9.072; 533.92

FORMATION OF THE GAS FLOW IN THE PLASMA-CHEMICAL REACTOR

Vyacheslav F. Myshkin,

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: gos100@tpu.ru

Valeriy A. Khan,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of
the Russian Academy of Science, 1, Academician Zuev Avenue,
Tomsk, 634055, Russia. E-mail: nt.centre@mail.ru

Evgeniy V. Bespala,

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bespala90@tpu.ru

Milan Tichy,

Charles University in Prague, 2, V Holesovickach, Prague 8, 18000,
Czech Republic. E-mail: tichy@nbox.troja.mff.cuni.cz

Dmitriy A. Izhoikin,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Avenue,
Tomsk, 634003, Russia. E-mail: info@tsuab.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to optimize the geometry of the plasma-chemical reactor to increase the isotope effects.

The main aim of the study is the search for the optimal geometry of plasma-chemical reactor, which provides high-localization of the plasma flow in the axial region to reduce the back diffusion effect, leading to equalization of isotope concentration.

The methods used in the study: calculation and optimization of the gas flow within the plasma-chemical reactor by the unsteady Navier–Stokes equations and Fourier by the method of finite-difference components using COMSOL.

The results. The authors explained the mechanism of isotopic concentration change in the products of plasma-chemical reactions due to the spin separation of carbon isotopes in a nonequilibrium low-temperature plasma in a magnetic field. An analysis of the processes occurring inside the plasma-chemical reactor of constant width was carried out. It is expected that the reduction of isotope effects is associated with the oxidation of the dispersed phase, which is located on the reactor walls. A method and apparatus for limiting the contact area of the high-temperature plasma flow with the walls of the chamber was proposed. Calculation of gas flows inside the plasma-chemical reactor of the selected geometry was carried out. It is shown that for the contraction of high temperature gas flow in the central region and isolating it from the walls of the plasma reactor can be used thin diaphragm of temperature-resistant material. It was also shown that the wall temperature of the plasma-chemical reactor in the region between the diaphragms does not exceed the evaporation temperature of the dispersed phase in some plasma gas flow. The highest possible isotope effect which occurs in the processes of plasma in a magnetic field is largely retained.

Key words:

Plasma flow, reactor, carbon isotope, oxidation, soot.

REFERENCES

1. Mei D., Zhu X., Wu C. Plasma-photocatalytic conversion of CO₂ at low temperatures: understanding the synergistic effect of plasma-catalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 182, pp. 525–532.
2. Wang C.X., Lv J.C., Ren Y., Chen J.Y., Zhou Q.Q., Lu Z.Q., Gao D.W., Jin L.M. Surface modification of polyester fabric with plasma pretreatment and carbon nanotube coating for antistatic property improvement. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 359, pp. 196–203.
3. Semboshi S., Iwase A., Takasugi T. Surface hardening of age-hardenable Cu–Ti alloy by plasma carburization. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 283, pp. 262–267.
4. Schiavon M., Scapinello M., Tosi P. Potential of non-thermal plasmas for helping the biodegradation of volatile organic compounds (VOCs) released by waste management plants. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 104, pp. 211–219.
5. Myshkin V.F., Khan V.A., Plekhanov V.G., Izhoikin D.A., Bespala E.V. Spin isotope separation under incomplete carbon oxidation in a low-temperature plasma in an external magnetic field. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1442–1448.
6. Myshkin V.F., Khan V.A., Izhoikin D.A., Ushakov I.A. Isotope effects of plasma chemical carbon oxidation in a magnetic field. *Natural Science*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 57–61.
7. Myshkin V.F., Izhoikin D.A., Ushakov I.A., Shvetsov V.F. Physical and chemical processes research of isotope separation in plasma under magnetic field. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 128–133.
8. Weinberg F.J., Dunn-Rankin D., Carleton F.B., Karnani S., Markides C., Zhai M. Electrical aspects of flame quenching. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 3295–3301.
9. Nikiforov L.Li., Britun N., Shyders R., Leys C. Emission and absorption spectroscopy study of Ar excited states in 13.56 MHz ar-

- gon plasma operating at sub-atmospheric to atmospheric pressure. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, vol. 107, pp. 75–85.
10. Rosado-Lausell S.L., Wang H., Gutierrez L., Romero-Maraccini O.C., Niu Xi-Zhi, Gin K.Y., Croue J.P. Roles of singlet oxygen and triplet excited state of dissolved organic matter formed by different organic matters in bacteriophage MS2 inactivation. *Water Research*, 2013, vol. 47, no. 14, pp. 4869–4879.
 11. Brzhezinskaya M., Shmatko V., Yalovega G., Yalovega G., Krestinin A., Bashkin I., Bogoslavskaja E. Electronic structure of hydrogenated carbon nanotubes studied by core level spectroscopy. *Related Phenomena*, 2014, vol. 196, pp. 99–103.
 12. Yench A.J., Ellis K., King G.C. High-resolution threshold photoelectron and photoion spectroscopy of molecular nitrogen in the 15.0–52.7 eV photon energy range. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2014, vol. 195, pp. 160–173.
 13. Vanin V.R., Manso G., Maidana N.L., Martins M.N., Fernandez-Varea J.M. Ag K-shell ionization by electron impact: new cross-section measurements between 50 and 100 keV and review of previous experimental data. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, vol. 119, pp. 14–23.
 14. Yan B., Caflisch R.E., Barekat F. Analysis and simulation for a model of electron impact excitation/deexcitation and ionization/recombination. *Journal of Computational Physics*, 2015, vol. 299, pp. 747–786.
 15. Guerra M., Parente F., Santos J.P. Electron impact ionization cross sections of several ionization stages of Kr, Ar and Fe. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, vol. 348, pp. 1–8.
 16. Glumov D.N., Strekalov A.V. Sposob rascheta dinamicheskoy вязкости газов v širokom diapazone davleniy [The method for calculating the dynamic viscosity of the gas over a wide range of pressures]. *Neftegazovoe delo*, 2011, no. 1, pp. 194–209. Available at: http://ogbus.ru/authors/Glumov/Glumov_1.pdf (accessed 20 November 2015).
 17. Myshkin V.F., Izhoikin D.A., Bepala E.V., Ushakov I.A. Carbon and oxygen atoms distribution along low-temperature plasma torch in the magnetic field. *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1084, pp. 93–96.
 18. Ladyzhenskaya O.A. Issledovanie uravneniya Nave-Stoksa v sluchae statsionarnogo dvizheniya neszhimaemoy zhidkosti [Investigation of the Navier-Stokes equation for stationary motion of an incompressible fluid]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1959, vol. 14, iss. 3, pp. 75–97.
 19. Wei D. Regularity criterion to the axially symmetric Navier–Stokes equations. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2016, vol. 435, pp. 402–413.
 20. Dahai L., Chao Y., Xiaoyong W. Computational study of supersonic turbulent-separated flows using partially averaged Navier-stokes method. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 107, pp. 234–246.
 21. Koike K., Ono N. Light intensity analysis of plasma jet constriction with applied magnetic field. *Vacuum*, 2008, vol. 83, no. 1, pp. 25–28.
 22. Bepala E.V., Davydov E.Yu. Modelirovanie gazovykh potokov pri plazmennoy separatsii izotopov ugleroda v magnitnom pole [Simulation of gas flow in the plasma separation of carbon isotopes in the magnetic field]. *Sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov «Vysokie tekhnologii v sovremennoy nauke i tekhnike»* [Proc. 4th Int. Scient. and Tech. Conf. of young scientists and students. High technology of modern science and technology]. Tomsk, 2015. pp. 34–38.
 23. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 736 p.
 24. Hazanee A., Lesnic D., Ismailov M.I., Kerimov N.B. An inverse time-dependent source problem for the heat equation with a non-classical boundary. *Applied Mathematical Modeling*, 2015, vol. 39, no. 20, pp. 6258–6272.
 25. Farber K., Farber P., Grabel J., Krick S., Reitz J., Ueberholz P. Development and validation of a coupled Navier-Stokes. *Applied Mathematics and Computation*, 2016, vol. 272, no. 1, pp. 648–656.
 26. Sebastian G., Shine S.R. Natural convection from horizontal heated cylinder with and without horizontal confinement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, pp. 325–334.

Received: 30 November 2015.

УДК 550.814:551.351: 550.8.014

МОНИТОРИНГ ПЕРЕНОСА ПРИДОННОГО ПОТОКА ОСАДКОВ В ПРИБРЕЖНО-МОРСКОЙ ЗОНЕ ШЕЛЬФА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Ильин Владимир Вениаминович,

главный специалист общества с ограниченной ответственностью «РН-СахалинНИПИморнефть»,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Амурская, 53. E-mail: vladimirilyin7@gmail.com

Мелкий Вячеслав Анатольевич,

доктор технических наук, заведующий кафедрой геологии и природопользования, директор
Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета,
Россия, 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 42. E-mail: vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович,

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

Гальцев Алексей Андреевич,

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

Зарипов Олег Мансурович,

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

Долгополов Даниил Валентинович,

научный сотрудник Московского государственного университета геодезии и картографии,
Россия, 105064, г. Москва, пер. Гороховский, 4. E-mail: d-daniil@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью моделирования возможных сценариев развития природных процессов и связанной с ними геоэкологической обстановки в связи с активизацией освоения шельфа.

Цель работы: выявление интегральных связей эндогенного и экзогенного факторов, определение индикаторов направленности процессов при транспортировке придонного слоя наносов, характеризующих состояние структурного блока и обстановки осадконакопления, для включения их в модели геоэкологического состояния экосистем.

Методы исследования: отбор проб осадков выполнен с помощью донной станции пробоотбора, представляющей собой сварную конструкцию со съемными пробоотборниками – трубками диаметром 100 мм и высотой 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50 и 100 см; привязка на местности производилась с помощью компактного портативного устройства Garmin eTrex Legend HCx; запись в каталог координат снятых точек осуществлялась в географических координатах с возможностью вывода на печать; подводное фотографирование, видеосъемка и аэрофотосъемка проводились с помощью специального фотоаппарата Nikon Coolpix; батиметрический промер акватории производился двухчастотным съемочным эхолотом Echotrack DF3200-MK III; гранулометрический состав отобранных проб был определен лазерным анализатором размеров частиц SALD 2300 Shimadzu; аэрофотосъемка выполнялась на каждом этапе в количестве 10 маршрутов с использованием паравлана; обследования дна в точках пробоотбора и отбор образцов донной станции произведен водолазами; выполнен анализ данных спутниковых съемок с аппаратов TERRA и Landsat.

Результаты. По данным экспериментальных исследований, произведенных в период с 2012 по 2014 г. на юго-восточном шельфе острова Сахалин, выполнена оценка геоэкологических процессов в прибрежно-морской части шельфа. Экспериментальные исследования и обработка полученных данных были направлены на изучение поведения частиц осадочного материала в придонном потоке. Выявлены интегральные связи эндогенного и экзогенного факторов. Определены поведенческие индикаторы, характеризующие состояние структурных блоков и обстановку осадконакопления.

Выводы. В придонном потоке наносов экзогенный фактор в условиях, созданных его переменными (течениями и ветром), привносит на исследуемый участок осадочный материал, который распределяется по объему и размерам на различных уровнях придонного потока. Эндогенный фактор формирует береговой и донный рельеф, переходную зону от пляжа к локальной возвышенности – бара, – в пределах которой идет перенос и аккумуляция осадочного материала и формирование мезорельефа.

Ключевые слова:

Шельф, перенос осадочного материала, экзогенный и эндогенный факторы, седиментация, аккумуляция, эрозия, неотектоника, индикаторы поведения малоразмерных частиц, мониторинг природных процессов, моделирование.

ОХОТСКОЕ

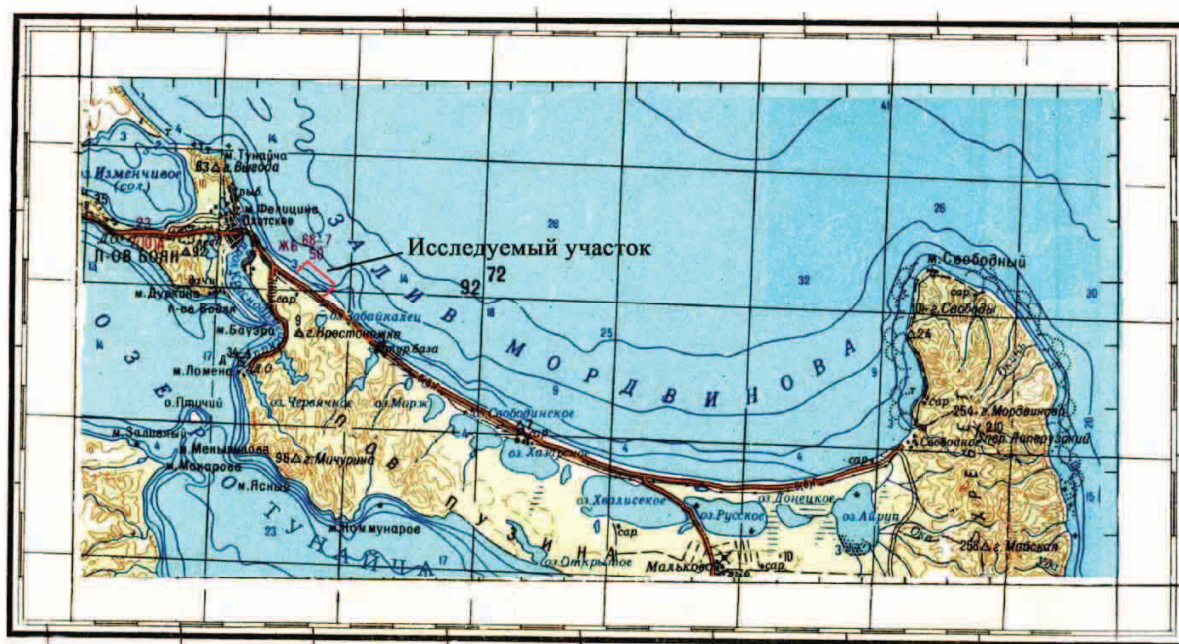


Рис. 1. Схема расположения района работ в заливе Мордвинова

Fig. 1. Research area in Mordvinova bay

Введение

Численное моделирование гидродинамических процессов, формирующих геоэкологическую обстановку, ведется на основе обобщения информации о дрейфе буйковых станций, морского льда, анализа результатов космического мониторинга и наблюдений с судов. Работы по созданию моделей гидродинамических процессов в Охотском море выполняются с 70-х годов XX в. [1, 2]. Тем не менее, вопрос о создании адекватной прогностической модели для шельфовой зоны высокого пространственного разрешения остается открытым вследствие недостатка данных наблюдений и сложности и многогранности моделируемого объекта. Наиболее адекватными решениями полной бароклинной задачи для Охотского моря являются модели Бергенского университета [3] в сочетании с ГИС «Сахалинский шельф» [4–8] и Института вычислительной математики РАН [9, 10]. Для проверки адекватности разработанных моделей и их корректировки необходимо использовать данные, полученные при мониторинге шельфовой зоны, как посредством спутниковых наблюдений [11–15], так и при контактных измерениях, выполняемых при морских экспериментальных исследованиях [16, 17]. В результате выполненного исследования были определены индикаторные показатели, наиболее точно отражающие направленность морфолитодинамических процессов в шельфовой зоне.

Исходные данные

Для оценки развития современных геоэкологических процессов и построения модели их разви-

тия в заливе Мордвинова на восточном шельфе о. Сахалин (рис. 1) был выполнен комплекс исследований, направленный на изучение перемещения частиц осадков в придонном слое и состава частиц морского дна. Кроме того, для общей характеристики участка были привлечены данные геофизических исследований, океанографических и аэрофотосъемки (рис. 2). Наблюдения выполнялись в три этапа на протяжении трех лет – в 2012–2014 гг.

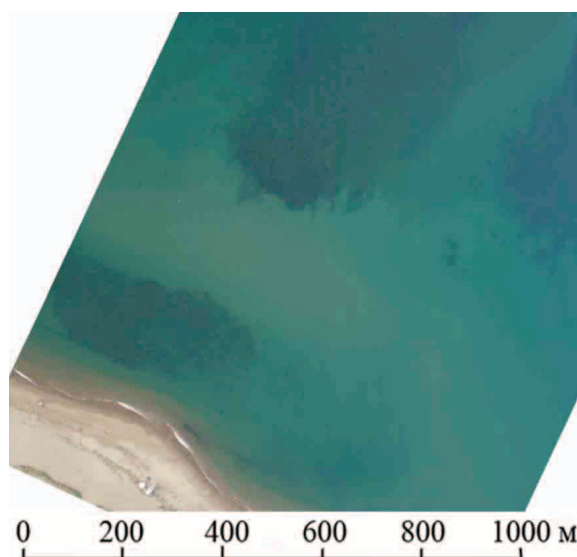


Рис. 2. Аэрофотоснимок исследуемого участка

Fig. 2. Aerial photo of the research area

Основной упор в исследованиях был сделан на сбор осадочного материала, перемещаемого в придонном слое; материала, слагающего морское дно и пляж, и лабораторной оценке размеров его частиц, вплоть до размера в 17 нм.

Отбор проб донного материала в количестве 30 штук был выполнен водолазом по линиям пяти профилей, равномерно по всей площади исследований.

Сбор осадочного материала, переносимого течениями на различных уровнях придонного слоя, осуществлялся с помощью донной станции с установленными на ней улавливающими трубками (рис. 3). Трубки съёмные, внутренний диаметр 10 см, высота трубок над дном моря (высота приёма осадочного материала): 0, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 см. Первый уровень – на нулевой отметке – наблюдательный, отбор проб не выполнялся. Работы производились в условно штилевую погоду: при высоте зыби, не превышающей 0,5 м.



Рис. 3. Станция для пробоотбора перемещаемых осадков из придонного потока

Fig. 3. Seabed sampler station for the sampling of sedimentary material in the bottom stream

Для защиты от вымывания накопленного материала при подъеме на поверхность, водолазы закрывали входные отверстия трубок, а затем донная станция поднималась на борт (рис. 4).

Промер глубин выполнен в 2012–2014 гг. Размеры участка – 2×1 км, протяженность вдоль берега – 2 км, вглубь моря – 1 км. Батиметрический промер акватории производился двухчастотным съемочным эхолотом Echotrack DF3200-MK III. Ра-

бочие частоты: 10–50 кГц и 100–750 кГц. Разрешение – 0,01 м. Диапазон глубин – 0,2–200 м. Эхолоты данного типа хорошо зарекомендовали себя при выполнении батиметрических работ [18, 19].



Рис. 4. Извлечение накопленных осадков из пробоотборной трубки на борту

Fig. 4. Extruding of the sediment material from the sampler on board

На выбранном участке исследований выделяется локальное возвышение с превышением над окружающим дном моря на 4–8 м (рис. 5).

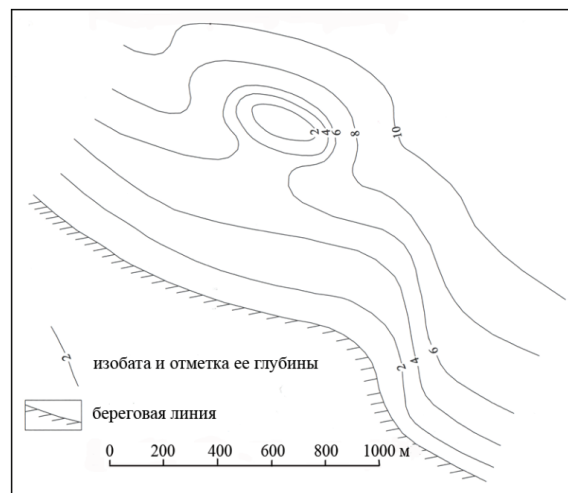


Рис. 5. Батиметрическая схема участка исследований, составленная по данным эхолотного промера

Fig. 5. Bathymetry scheme of the research area as the result of echosounding profiling

Сейсмоакустические профили были заложены по сетке 0,5×1,0 км. По результатам сейсмоакустического профилирования мощность рыхлых отложений на участке составляет 2,5–3,5 м и, соответственно, уменьшается до 0 м в районе отмели (рис. 6).

В пределах исследуемого участка по характерному геоморфологическому строению морского дна и примыкающего побережья выделяются возможные границы трех нарушений, по которым проходят границы блоковых структур. Первое вы-

тянуто в меридиональном направлении, проходит посередине участка и картографируется по характерному изгибу изобат. Второе проходит по южной границе возвышенности с северо-запада на юго-восток, выделяется по геоморфологическому строению дна моря. Третье проходит вдоль берега в юго-восточном направлении, выделяется по обрывистому берегу и резкому свалу глубин в прибрежной зоне. Меридиональная и субмеридиональная направленность разрывных нарушений совпадает с направлениями выделенных структурообразующих границ для данного района (рис. 7). Также в результате водолазных обследований дна моря в районе возвышенности выявлено ступенчатое строение микроблоков коренных пород с высотой «ступеней» от 0,3 до 1,2 м, характеризующих наличие тектонических нарушений с разнонаправленным или разноскоростным движением прилегающих блоков.

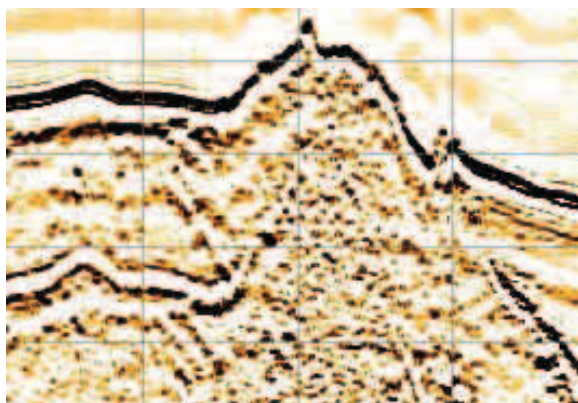


Рис. 6. Вид отмели на сейсмоакустической записи

Fig. 6. Recording of the bank at sub-bottom profile

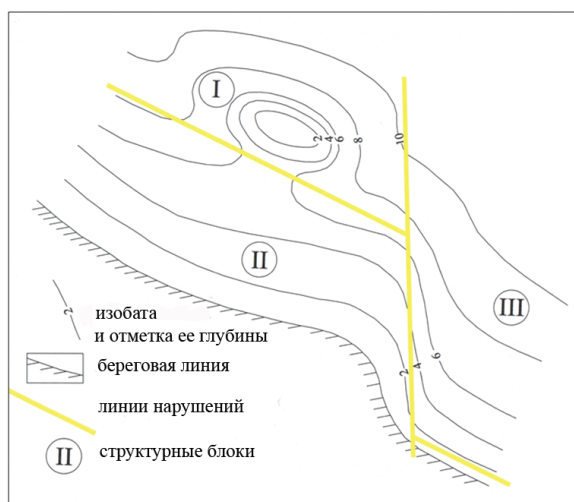


Рис. 7. Структурные блоки, выделенные при исследованиях

Fig. 7. Structural blocks at the research area

В результате предварительных исследований и первичных исследований участка было выделено три блока (рис. 7) с различным состоянием современной тектонической обстановки и, соответствен-

но, с различными условиями современного осадконакопления:

- 1) блок локального поднятия с тенденцией к устойчивому подъему;
- 2) блок в относительно равновесном состоянии;
- 3) блок локальной депрессии с тенденцией к опусканию.

Сочетание двух факторов – эндогенного и экзогенного – и преобладание одного над другим или их равновесное состояние определяют условия осадконакопления [20, 21]. Исследование взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов – весьма сложная задача, которая трудно решается не только на море, но и на суше [22, 23]. В процессе экспериментальных геоморфологических мониторинговых наблюдений было важно получить количественные характеристики этого взаимодействия.

На основе исходных данных в пределах выделенных блоков наблюдалась следующая обстановка характерного осадконакопления: в пределах первого блока – эрозия морского дна; второго – транзит морских осадков; третьего – аккумуляция морских осадков. На протяжении трех лет в районе каждого блока был выполнен типовой комплекс исследований с постановкой станции донного пробоотбора на глубину 4,2 м.

Анализ и оценка количественного переноса донных осадков

Как было описано выше, придонный поток осадочного материала был разделен на восемь горизонтов (рис. 8): 1 см (1), 2 см (2), 3 см (3), 5 см (4), 10 см (5), 20 см (6), 50 см (7), 100 см (8). По результатам наблюдений, первые четыре уровня пробоотборников были, как правило, заполнены. Но не редко в них отмечалось частичное отсутствие материала, связанное с небольшой высотой стенок пробоотборников, которая позволяет вовлекать поступивший материал в последующее движение донного потока и, соответственно, выносить его из трубки.

Наибольший объем сбора осадков наблюдался на 4 и 5 уровнях (5 и 10 см) с сопоставимыми временными показателями – от нескольких граммов и десятков граммов до двухсот и более граммов в сутки. Это уровень максимального перемешивания донного потока и наибольшей вовлеченности осадков в процесс его перемещения. Причем на уровне 10 см «выбрасывания» осадков из пробоотборника в спокойную погоду практически не происходит из-за достаточной высоты стенок трубки.

На уровнях 6 и 7 весовые показатели в 4–5, иногда в 10 раз, ниже, чем на 4 или 5 уровнях. На 8 уровне этот показатель в несколько десятков раз ниже тех же уровней.

Традиционно мощность придонного потока оценивается в 1,5 м [24–26]. Исходя из вышесказанного, придонный поток по активности переноса осадочного материала можно разделить на зоны (рис. 9):

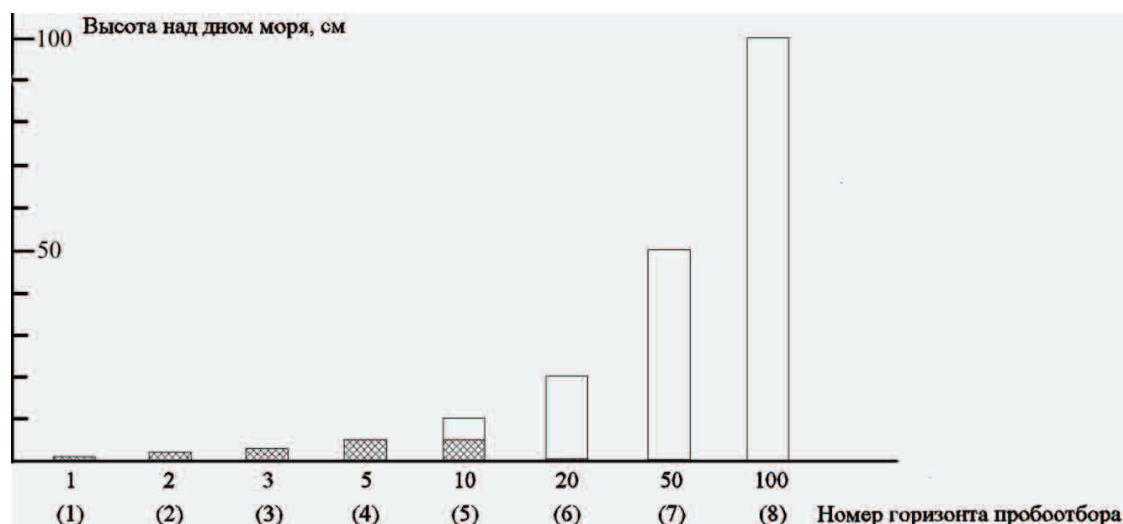


Рис. 8. Уровень наполнения трубок пробоотборников осадочным материалом

Fig. 8. Level of the sediment material at the samplers

- 1) от 0 до 0,2 м – активная зона;
- 2) от 0,2 до 1,0 м – переходная зона;
- 3) от 1,0 до 1,5 м – малоактивная зона.

По результатам подсчета среднесуточного объема переноса осадочного материала, среднегодовой объем переноса осадков на один квадратный метр составляет:

- I блок $\approx 2,7$ т/м² в год;

- II блок $\approx 3,0$ т/м² в год;
- III блок $\approx 3,2$ т/м² в год.

Очевидно, что объемы переносимого осадочного материала нарастают от первого блока к третьему. Это выявленная закономерность подтверждает различие условий и обстановок осадконакопления для выделенных структурных блоков.

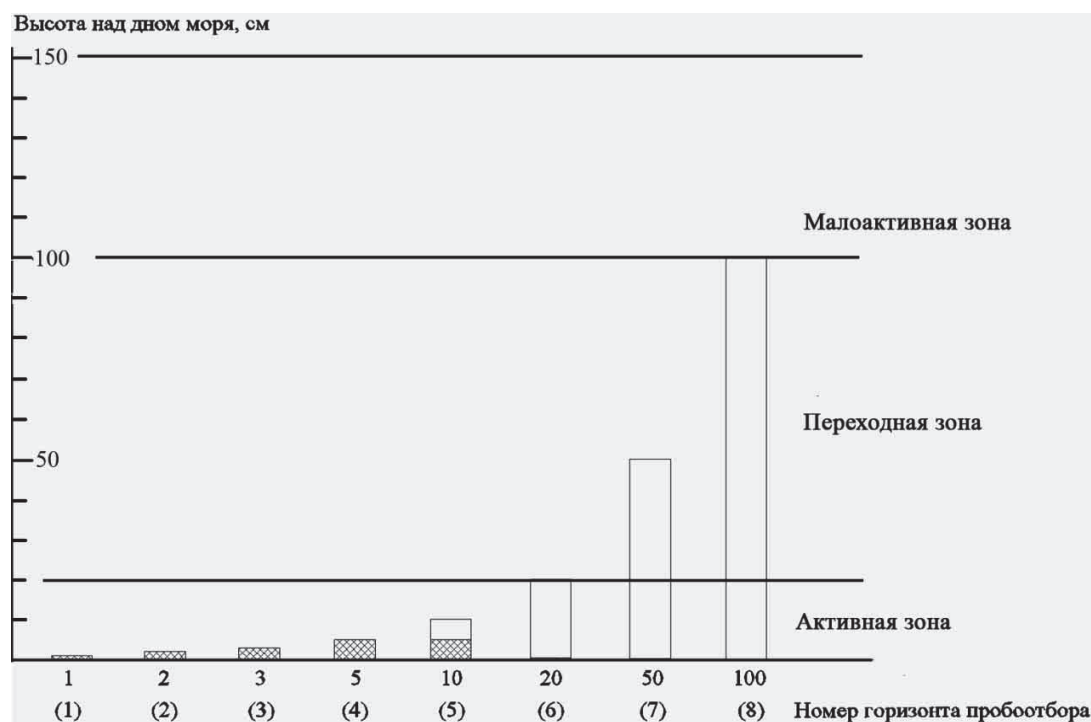


Рис. 9. Выделение зон активности переноса осадочного материала в придонном потоке по высоте пробоотборников (от 1 до 100 см) и объемам осадочного материала в пробоотборниках

Fig. 9. Active zones of sediment material transporting in the bottom stream depending on the sampler height (from 1 to 100 cm) and volume of the sediments at the samplers

Анализ и оценка гранулометрического состава переносимого материала: результаты мониторинга

Анализ гранулометрического состава частиц выполнялся на оборудовании SALD-2300 (Shimadzu Laser Diffraction Particle Size Analyzer) с возможностью определения размеров частиц от 17 нм до 2,5 мм.

По результатам лабораторных исследований, строение и состав активной и переходной зон в различных структурных блоках практически не отличаются друг от друга – в основном это песок мелкий-средний, реже – крупный. Тонкодисперсные (глинистые) частицы встречаются в единичных образцах и составляют объем менее 0,08 % в пробе.

Заметные отличия в наборе гранулометрических фракций осадочного материала для различных структурных блоков наблюдаются в малоактивной зоне придонного потока:

- I блок – ни в одном образце не выявлено осадков глинистой фракции ($< 0,002$ мм);
- II блок – в двух образцах наблюдается присутствие глинистой фракции в объеме до 0,1 %;
- III блок – в каждом образце отмечено наличие глинистых осадков в объемах от 0,3 до 0,6 %.

В приведенных значениях наблюдается явная закономерность: в районе третьего блока отмечается тенденция к выпадению в осадок глинистых частиц.

Точки выполнения пробоотбора находятся относительно недалеко друг от друга – в нескольких сотнях метров, поэтому придонный поток на всей площади исследований в целом по составу является довольно однородным. Следовательно, наблюдаемая закономерность свидетельствует о свойстве малоактивной зоны придонного потока сохранять в своем составе или оставлять в осадке глинистые частицы в зависимости от принадлежности участков к различным структурным блокам.

На участке исследований было выделено три блока, имеющих различную динамику и направленность вертикальных движений: первый блок испытывает поднятие, второй – равновесное состояние, третий – опускание. Исходя из выявленных закономерностей, можно охарактеризовать состояние глинистых частиц малоактивной зоны придонного потока над каждым из структурных блоков:

- для поднимающихся структур – частицы испытывают незначительные вертикальные колебания, связанные с волнением моря, но в основном движутся в горизонтальном направлении в общей массе потока, без каких-либо тенденций к нисходящим движениям;
- для структур в равновесном состоянии – глинистые частицы также испытывают незначительные вертикальные колебательные движения, связанные с волнением моря, основное движение – горизонтальное в общем потоке с весьма незначительной тенденцией к нисходящим движениям;

- для нисходящих структур – глинистые частицы испытывают значительные вертикальные колебания, близкие к орбитальным траекториям, со значительной тенденцией к нисходящим движениям.

Как было отмечено выше, в активной и переходной зонах больших различий в составе частиц для различных структурных блоков не наблюдается. Движение частиц идет по орбитам в направлении общего потока. Глинистые частицы «захватываются» крупными песчаными частицами гравитационно, кроме того, шероховатость поверхности и обилие соприкосновений с трудом позволяют им покинуть активную (и переходную) зону придонного потока.

В малоактивной зоне, в отличие от двух ниже лежащих зон, движущиеся частицы уже практически не оказывают гравитационного и кинетического воздействия друг на друга и потому могут служить самостоятельными *индикаторами* развивающейся обстановки. То есть по направлению своего движения характеризовать общую гравитационную обстановку и, соответственно, непосредственно указывать на условия эрозии, транспортировки или аккумуляции осадков.

Описанные свойства глинистых частиц при прохождении различных структурных блоков, скорее всего, связаны с гравитационной составляющей самих блоков и их собственной тенденцией к более сильному или ослабленному притяжению, которое наиболее заметно проявляется на легких подвижных тонких частицах малоактивной зоны, не связанных взаимным притяжением, как в активной зоне придонного потока.

Гранулометрический состав и объем осадочного материала в целом может быть оценен как интегральная характеристика, отображающая основные пространственные закономерности изменения литогенной основы участка, формирующей его рельеф и обеспечивающей взаимосвязь двух базовых рельефообразующих факторов: эндогенного и экзогенного.

Два фактора независимо друг от друга формируют в системе условия, изначально никак не связанные между собой: экзогенный фактор формирует постоянно действующие и приливно-отливные течения, ветер и волнение, температуру и соленость; эндогенный фактор оказывает воздействие на глубинные структуры земной коры, создает дизъюнктивные нарушения, закладывает структурные блоки и задает условия их состояния направленности движения, что отмечалось многими исследователями [27, 28].

На нижнем уровне экзогенный фактор в условиях, созданных его переменными (течениями и ветром), привносит на исследуемый участок осадочный материал, который распределяется по объему и размерам на различных уровнях придонного потока [29, 30]. Эндогенный фактор формирует береговой и донный рельеф, переходную зону от

пляжа к локальной возвышенности, в пределах которых идет перенос и аккумуляция осадочного материала и формирование мезорельефа. Происходит активное влияние двух факторов и их переменных друг на друга [31, 32]. Сформированный рельеф оказывает влияние на подход волн к берегу и, соответственно, на характер привноса и отложения осадков. Выявление наиболее значимых характеристик процессов позволяет создавать качественные адекватные модели [33–36].

Заключение

Таким образом, множество свойств, потенциальных состояний (значений) каждого свойства и его проявления в результате обработки данных мониторинга было сведено к поиску одного индикатора характеристики существующей обстановки осадконакопления – поведение глинистых частиц малоактивной зоны придонного потока. По характеру движения глинистых частиц можно характеризовать общую гравитационную обстановку и, соответственно,

непосредственно указывать на условия эрозии, транспортировки или аккумуляции осадков:

- для поднимающихся структур (эрозионная обстановка) – частицы испытывают незначительные вертикальные колебания, связанные с волнением моря, но в основном движутся в горизонтальном направлении в общей массе потока, без каких-либо тенденций к нисходящим движениям;
- для структур в равновесном состоянии (обстановка транзита осадков) – глинистые частицы также испытывают незначительные вертикальные колебательные движения, связанные с волнением моря, основное движение – горизонтальное в общем потоке с весьма незначительной тенденцией к нисходящим движениям;
- для нисходящих структур (аккумулятивная обстановка) – глинистые частицы испытывают значительные вертикальные колебания, близкие к орбитальным траекториям, со значительной тенденцией к нисходящим движениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.Ф. Расчет уровневой поверхности в Охотском море // Труды ДВНИИ, 1972. – Вып. 37. – С. 37–43.
2. Зырянов В.Н. Численный расчет установившихся течений Охотского моря: (прогностическая модель) // Труды ВНИРО, 1977. – Т. 119. – С. 42–30.
3. Berntsen J. Users guide for a modesplit-coordinate numerical ocean model. – Bergen: University of Bergen, 2004. – 51 p.
4. Пищальник В.М., Тамбовский В.С. Атлас льдов Охотского и Японского морей (иллюстрированное справочное пособие). – Южно-Сахалинск, 1993. – 195 с.
5. Пищальник В.М., Бобков А.О. Моделирование природных процессов на основе ГИС «Сахалинский шельф»: учебное пособие. – Южно-Сахалинск, 2008. – 103 с.
6. Моделирование условий функционирования экосистемы Татарского пролива / В.М. Пищальник, А.В. Леонов, В.С. Архипкин, В.А. Мелкий. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. – 104 с.
7. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Ч. I. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2000. – 174 с.
8. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Ч. II. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2000. – 108 с.
9. Марчук Г.И., Залесный В.Б. Моделирование циркуляции мирового океана с четырехмерной вариационной ассимиляцией полей температуры и солёности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 15–29.
10. Залесный В.Б., Дианский Н.А., Конторовский С.Э. Численное моделирование динамики вод Охотского моря // Дальневосточные моря России: в 4 кн. Кн. 1: Океанологические исследования / отв. ред. В.А. Акуличев; Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН. – М.: Наука, 2007. – С. 335–386.
11. Кравцова В.И., Уваров И.А. Гиперспектральная система MODIS для глобального мониторинга Земли // Информ. бюл. ГИС-ассоц. – 2001. – № 2 (29) / 3 (30). – С. 39–41.
12. Повышение точности расчета скоростей поверхностных течений по спутниковым изображениям / А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.А. Загумённых, В.А. Качур // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2015. – Т. 3. – № 181. – С. 59–66.
13. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана на Дальнем Востоке // Дальневосточные моря России: в 4 кн. Кн. 1: Океанологические исследования / отв. ред. В.А. Акуличев; Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН. – М.: Наука, 2007. – С. 607–641.
14. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач / Е.А. Лупян, В.П. Саворский, Ю.И. Шокин, А.И. Алексанин, Р.Р. Назиров, И.В. Недолужко, О.Ю. Панова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 5. – С. 21–44.
15. Использование данных дистанционного зондирования для исследования мелководий шельфовой зоны / В.А. Мелкий, В.М. Пищальник, А.А. Гальцев, И.В. Еременко, Н.С. Семенов // Земля из космоса – наиболее эффективные решения: материалы 5-й Международной конференции (г. Москва, 29 ноября – 2 декабря 2011 г.). – М.: СпбЭкс, 2011. – С. 144–145.
16. Ильин В.В. Эндогенные и экзогенные факторы в процессах эрозии, переноса и аккумуляции осадков на северо-восточном шельфе острова Сахалин // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 17–22.
17. Балгуев Т.Р., Братков В.В. Оценка внутригодовой изменчивости территории о-ва Тюлений (по материалам дистанционного зондирования) // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – № 1. – С. 44–51.
18. On the vertical and temporal structure of flow and stress within the turbulent oscillatory boundary layer above evolving sand ripples / A.E. Hay, L. Zedel, R. Cheel, J. Dillon // Continental Shelf Research. – 2012. – V. 46. – P. 31–49.
19. Decimeter-scale in situ mapping of modern cross-bedded dune deposits using parametric echo sounding: a new method for linking river processes and their deposits / G.S. Smith, J.L. Best, O. Orfeo, M.E. Vardy, J.A. Zinger // Geophysical Research Letters. – 2013. – V. 40. – P. 1–5.
20. Ионин А.С., Медведев В.С., Павлидис Ю.А. Шельф: рельеф, осадки и их формирование. – М.: Мысль, 1987. – 205 с.
21. Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Горбаренко С.А. Особенности поставки и распределения кластогенного материала в Охот-

- ском море в позднечетвертичное время // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23. – Вып. 1. – С. 37–52.
22. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. – М.: Изд. Моск. ун-та: Наука, 2006. – 416 с.
 23. Евсеева Н.С., Окишев П.А. Экзогенные процессы рельефообразования и четвертичные отложения суши: учебное пособие. Ч. I. – Томск: Изд. НТЛ, 2010. – 300 с.
 24. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В., Подымов И.С. Динамические процессы береговой зоны моря. – М.: Научный мир, 2003. – 325 с.
 25. Завьялов И.Н., Жмур В.В. Интенсивные взвесенесущие потоки в придонном слое океана на наклонном дне // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 158–167.
 26. Kumari V.R., Rao I.M. Suspended sediment dynamics in Krishna estuary, east coast of India // Indian Journal of Marine Science, 2010. – V. 39 (2). – P. 248–256.
 27. Рельеф и некоторые аспекты палеогеографии позднего валдая – голоцена в районе о. Варандей (Баренцево море) / И.Г. Авенариус, А.А. Ермолов, В.И. Мысливец, Т.Ю. Репкина // Седиментационные процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Кн. 1. – Апатиты, 2001. – С. 135–146.
 28. Carvajal C. Sediment supply: the main driver of shelf-margin growth // Earth-Science Reviews. – 2009. – № 96. – Iss. 4. – P. 221–248.
 29. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring // Comput. Geosci. – 2008. – № 34. – P. 1263–1283.
 30. Quantitative characteristics of the Indian Ocean seafloor relief using fractal dimension / B. Chakraborty, V. Mahale, K. Shashikumar, K. Srinivas // Indian Journal of Marine Science. – 2007. – V. 36 (2). – P. 152–161.
 31. Mathematical modeling of water circulation on eastern shelf of Sakhalin island / V.M. Pishchalnik, V.S. Arkhipkin, A.V. Leonov, I.G. Minervin, V.A. Melkiy // The 28th International symposium on Okhotsk sea & Sea ice. – Mombetsu, 2013. – P. 300–303.
 32. Review of studies of the Environment by remote sensing data in the Sakhalin State University / V.A. Melkiy, V.M. Pishchalnik, V.V. Ilin, A.A. Galtsev, O.M. Zaripov, A.A. Verkhoturov, I.V. Eremenko, Ya.P. Belyanina // The 29th International symposium on Okhotsk sea & Sea ice. – Mombetsu, 2014. – P. 103–106.
 33. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. Исследование особенностей генерации инфрагравитационных волн в прибрежной зоне моря // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2013. – № 3. – С. 60–64.
 34. Зенкин О.В., Мелкий В.А., Малинников В.А. Применение спутниковых данных MODIS для оценки антропогенных загрязнений вод Охотского моря // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 6. – С. 160–166.
 35. Зверев А.Т., Малинников В.А., Милованова М.С. ГИС-обеспечение топографического мониторинга северных территорий России // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 5. – С. 55–59.
 36. Бондур В.Г. Гребенюк Ю.В. Аэрокосмические методы определения рельефа дна в прибрежных зонах морей и океанов // Исследование Земли из космоса. – 2000. – № 6. – С. 59–73.

Поступила 21.11.2015 г.

UDC 550.814:551.351: 550.8.014

MONITORING OF TRANSFER OF THE NEAR-BOTTOM FLOW OF THE SEDIMENTS IN COASTAL ZONE OF THE SHELF TO IDENTIFY THE MAIN PARAMETERS OF THE MODELS OF THE ECOSYSTEMS

Vladimir V. Ilin,

«RN-SakhalinNIPImorneft» Limited Liability Company, 53, Amurskaya Street,
Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russia. E-mail: vladimirilyin7@gmail.com

Vyacheslav A. Melkiy,

Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya
Street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: vamelkiy@mail.ru

Aleksey A. Verkhoturov,

Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya
Street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: ussr-91@mail.ru

Aleksey A. Galtsev,

Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya
Street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: galts.alexey@gmail.com

Oleg M. Zaripov,

Oil and Gas Technical Institute of Sakhalin State University, 42, Pogranichnaya
Street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia. E-mail: ole-zaripov@mail.ru

Daniil V. Dolgopолоv,

Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4, Gorokhovskiy Avenue, Moscow, 105064, Russia. E-mail: d-daniil@yandex.ru

The relevance of the work is determined by the need to simulate possible scenarios of development of natural processes and the associated environment, in the conditions of active development of the shelf.

The main aim of the paper: identify the integral relationships of endogenous and exogenous factors of sedimentation, determining the indicators of the direction of the processes during transport of the near-bottom flow of sediment characterizing the structural tectonic block and the environment in place of sedimentation for inclusion in the model of geo-ecological conditions of ecosystems.

Research methods: sampling of sediments was made using bottom sampling-stations, representing a welded construction with removable sediment samplers – tubes with diameter of 100 mm and height of 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50 and 100 cm; binding on the ground was made by a compact handheld Garmin eTrex Legend HCx; entry in the catalogue of coordinates of observation points was carried out in geographic coordinates with the possibility to print; underwater photography, videography and aerial photography were carried out using a special camera Nikon Coolpix; bathymetric research on the area was conducted by means of dual frequency sounder DF3200 Echo-track MK III; granulometric composition of the samples was defined by laser particle size analyzer Shimadzu SALD 2300; aerial photography was carried out at each stage in the quantity of 10 routes with the use of the paraglider; underwater surveys of the seabed on stations of sampling were made by divers; used data of satellite shooting from vehicles TERRA and Landsat.

Results. Estimates of the research of geo-ecological processes in coastal parts of the shelf according to experimental studies were conducted in 2012–2014 in the South-Eastern shelf of Sakhalin island. Observing the behavior of particles of sedimentary material in the bottom stream. Integral connection of endogenous and exogenous factors was revealed. Behavioral indicators characterizing the state of structural blocks and the environment of sedimentation were also defined.

Conclusions. In the bottom sediments, an exogenous factor in the conditions created by its variables – currents and wind – brings on the studied area the sedimentary material which is distributed over the volume and dimensions at different levels of near-bottom flow. Endogenous factor forms the coastal and bottom topography, transition zone from the beach to a local hill – bar, – within which the sediment is transported and accumulated and mesorelief is formed.

Key words:

Shelf, sediment transporting, exogenous and endogen factors, sedimentation, accumulation, erosion, neotectonic, indicators of behavior of small-sized particles, monitoring of natural processes, modeling.

REFERENCES

1. Kozlov V.F. Raschet urovnenoy poverkhnosti v Okhotskom more [The calculation of the water level surface in the Okhotsk sea]. *Trudy DVNII*, 1972, iss. 37, pp. 37–43.
2. Zyryanov V.N. Chislennyi raschet ustanovivshikhsya techeniy Okhotskogo morya: (prognosticheskaya model) [Numerical calculation of steady-state currents of the Okhotsk sea: (predictive model)]. *Trudy VNIRO*, 1977, vol. 119, pp. 42–30.
3. Berntsen J. *Users guide for a modesplit-coordinate numerical ocean model*. Bergen, University of Bergen Publ., 2004. 51 p.
4. Pishchalnik V.M., Tambovskiy V.S. *Atlas Idov Okhotskogo i Yaponskogo morey* (illustrirovannoe spravochnoe posobie). [Atlas of the ices of the Okhotsk and Japan seas (illustrated textbook)]. Yuzhno-Sakhalinsk, 1993. 195 p.
5. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Modelirovanie prirodnykh protsessov na osnove GIS «Sakhalinskiy shelf»* [Modeling of natural processes based on GIS «Sakhalin shelf»]. Yuzhno-Sakhalinsk, 2008. 103 p.
6. Pishchalnik V.M., Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Melkiy V.A. *Modelirovanie usloviy funktsionirovaniya ekosistemy Tatarskogo proliva* [The modeling of the functioning of the ecosystem of the Tartar Strait]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Publ., 2011. 104 p.
7. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Okeanograficheskiy atlas shelfovoy zony ostrova Sakhalin. Ch. I* [Oceanographic atlas of the shelf zone of the Sakhalin island. Part I]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Publ., 2000. 174 p.
8. Pishchalnik V.M., Bobkov A.O. *Okeanograficheskiy atlas shelfovoy zony ostrova Sakhalin. Ch. II* [Oceanographic atlas of the shelf zone of the Sakhalin island. Part II]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Publ., 2000. 108 p.
9. Marchuk G.I., Zalesnyy V.B. Modelirovanie tsirkulyatsii mirovogo okeana s chetyrekhmernoy variatsionnoy assimilyatsiey poley temperatury i solenosti [Modeling of the World Ocean circulation with the four-dimensional assimilation of temperature and salinity fields]. *Izvestiya RAN. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 15–29.
10. Zalesnyy V.B., Dianskiy N.A., Kontorovskiy S.E. Chislennoe modelirovanie dinamiki vod Okhotskogo morya. *Dalnevostochnye morya Rossii*. Moscow, Nauka Publ., 2007. pp. 335–386.
11. Kravtsova V.I., Uvarov I.A. Giperspektralnaya sistema MODIS dlya globalnogo monitoringa Zemli [Hyperspectral system MODIS for global monitoring of the Earth]. *Informatsionnyy byulleten GIS-assotsiatsii*, 2001, no. 2 (29)/3 (30), pp. 39–41.
12. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G., Zagumennov A.A., Kachur V.A. Povyshenie tochnosti rascheta skorostey poverkhnostnykh techeniy po sputnikovym izobrazheniyam [Improving the accuracy of velocity analysis of surface currents on satellite images]. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 3, no. 181, pp. 59–66.
13. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G. Sputnikovoe informatsionnoe obespechenie monitoringa okeana na Dalnem Vostoke. *Dalnevostochnye morya Rossii*. Moscow, Nauka Publ., 2007. pp. 607–641.
14. Lupyan E.A., Savorskiy V.P., Shokin Yu.I., Aleksanin A.I., Nazarov R.R., Nedoluzhko I.V., Panova O.Yu. Sovremennye podkhody i tekhnologii organizatsii raboty s dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya resheniya nauchnykh zadach [Modern approaches and technologies to organization of work with remote sensing data of the Earth for solving scientific problems]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 21–44.
15. Melkiy V.A., Pishchalnik V.M., Galtsev A.A., Eremenko I.V., Semenov N.S. Ispolzovanie dannyykh distantsionnogo zondirovaniya dlya issledovaniya melkovodiy shelfovoy zony [The use of remote sensing data for exploration of the shallow waters of shelf zone]. *Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii «Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya»* [Proc. 5th Int. Conf. Earth from space – the most effective solutions]. Moscow, SknEKS Publ., 2011. pp. 143–145.
16. Ilin V.V. Endogennyye i ekzogennyye faktory v protsessakh erozii, perenosu i akkumulyatsii osadkov na severo-vostochnom shelfe ostrova Sakhalin [Endogenous and exogenous factors in sediment erosion, transporting and accumulation in the north-east shelf of Sakhalin island]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 17–22.
17. Balguyev T.R., Bratkov V.V. Otsenka vnutrigodovoy izmenchivosti territorii o-va Tyuleniya (po materialam distantsionnogo zondirovaniya) [Evaluation of within-year variability of the territory of the Tyuleniya island (based on materials of remote sensing)]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 44–51.
18. Hay A.E., Zedel L., Cheel R., Dillon J. On the vertical and temporal structure of flow and stress within the turbulent oscillatory boundary layer above evolving sand ripples. *Continental Shelf Research*, 2012, vol. 46, pp. 31–49.
19. Smith G.S., Best J.L., Orfeo O., Vardy M.E., Zinger J.A. Decimeter-scale in situ mapping of modern cross-bedded dune deposits using parametric echo sounding: a new method for linking river processes and their deposits. *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 1–5.
20. Ionin A.S., Medvedev V.S., Pavlidis Yu.A. *Shelf: relief, osadki i ikh formirovanie* [Shelf: relief, sediments and their formation]. Moscow, Mysl Publ., 1987. 205 p.
21. Derkach A.N., Nikolaeva N.A., Gorbarenko S.A. Osobennosti postavki i raspredeleniya klastogennoy materiala v Okhotskom more v pozdnechetvertichnoye vremya [Specificity of the supply and distribution of clastogenic material in the Okhotsk sea in Late Quaternary time]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2004, vol. 23, iss. 1, pp. 37–52.
22. Rychagov G.I. *Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 416 p.
23. Evseeva N.S., Okishev P.A. *Ekzogennyye protsessy relefoobrazovaniya i chetvertichnye otlozheniya sushi* [Exogenous processes of relief-formation and Quaternary sediments of dry land]. Tomsk, NTL Publ., 2010. 300 p.
24. Kosyan R.D., Pykhov N.V., Podymov I.S. *Dinamicheskie protsessy beregovoy zony morya* [Dynamic processes of the sea coastal zone]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2003. 325 p.
25. Zavyalov I.N., Zhmur V.V. *Intensivnyye vzvesenesushchie potoki v pridonnom sloe okeana na naklonnom dne* [Intensive streams carrying the suspension in the near-bottom layer of the ocean on sloping bottom]. *Trudy MIPT*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 158–167.
26. Kumari V.R., Rao I.M. Suspended sediment dynamics in Krishna estuary, east coast of India. *Indian Journal of Marine Science*, 2010, vol. 39 (2), pp. 248–256.
27. Avenarius I.G., Ermolov A.A., Myslivets V.I., Repkina T.Yu. Relief i nekotorye aspekty paleogeografii pozdnego valdaya – golotsena v rayone o. Varandey (Barentsevo more) [The relief and some aspects of paleogeography of the Late Valdai – Holocene in the vicinity of Varandey island (Barents sea)]. *Sedimentary processes and evolution of marine ecosystems in conditions of marine periglacial*. Apatity, 2001. pp. 135–146.
28. Carvajal C. Sediment supply: the main driver of shelf-margin growth. *Earth-Science Reviews*, 2009, no. 96, iss. 4, pp. 221–248.
29. Sanford L.P. Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Comput. Geosci.*, 2008, no. 34, pp. 1263–1283.
30. Chakraborty B., Mahale V., Shashikumar K., Srinivas K. Quantitative characteristics of the Indian Ocean seafloor relief using fractal dimension. *Indian Journal of Marine Science*, 2007, vol. 36 (2), pp. 152–161.
31. Pishchalnik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V., Minervin I.G., Melkiy V.A. Mathematical modeling of water circulation on eastern shelf of Sakhalin island. *The 28th International symposium on Okhotsk sea & Sea ice*. Mombetsu, OSCORA Publ., 2013. pp. 300–303.
32. Melkiy V.A., Pishchalnik V.M., Ilin V.V., Galtsev A.A., Zaripov O.M., Verkhoturov A.A., Eremenko I.V., Belyanina Ya.P.

- Review of studies of the Environment by remote sensing data in the Sakhalin State University. *The 29th International symposium on Okhotsk sea & Sea ice*. Mombetsu, OSCORA Publ., 2014. pp. 103–106.
33. Kovalev D.P., Kovalev P.D. Issledovanie osobennostey generatsii infragravitatsionnykh voln v pribrezhnoy zone morya [Research of features generation of infragravitation waves in the coastal area of the sea]. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, no. 3, pp. 60–64.
 34. Zenkin O.V., Melkiy V.A., Malinnikov V.A. Primenenie sputnikovyykh dannykh MODIS dlya otsenki antropogennykh zagryazneniy vod Okhotskogo morya [Use of MODIS satellite data for the estimation of anthropogenic pollution of the waters of the Okhotsk sea]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2007, no. 6, pp. 160–166.
 35. Zverev A.T., Malinnikov V.A., Milovanova M.S. GIS-obespechenie topograficheskogo monitoringa severnykh territoriy Rossii [GIS software topographic monitoring of the Northern territories of Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*, 2010, no. 5, pp. 55–59.
 36. Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V. Aerokosmicheskie metody opredeleniya relefa dna v pribrezhnykh zonakh morey i okeanov [Aerospace methods for determination of bottom topography in the coastal zones of Seas and Oceans]. *Atmospheric and Oceanic Physics Earth Observation and Remote Sensing*, 2000, no. 6, pp. 59–73.

Received: 21 November 2015.

УДК 624.131

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА УЧАСТКЕ НАБЕРЕЖНОЙ РЕКИ КАМЫ В ГОРОДЕ ПЕРМИ

Пургина Дарья Валерьевна,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: purgina_darya@mail.ru

Строкова Людмила Александровна,

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии,
инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: strokova@sibmail.com

Кузеванов Константин Иванович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии,
инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: kki@tpu.ru

Актуальность темы обусловлена необходимостью усовершенствования подходов к прогнозу и защите территорий от подтопления и сопутствующих процессов. Городское строительство, плотность застройки, подземные коммуникации, изменение естественного рельефа кардинально меняет естественную геологическую среду в границах осваиваемой территории. Под воздействием ряда факторов (застройки территорий, уплотнения горных пород под нагрузкой инженерных сооружений) формируются новые горизонты техногенной верховодки.

Целью исследования является изучение геологических, гидрогеологических и гидродинамических условий для долгосрочного прогноза их изменения при строительстве дополнительных подпорных стенок вдоль набережной реки Камы и краткосрочных – на период половодья.

Методика исследования. Исходными данными для изучения являются полевые материалы ОАО «Сибгипротранспут», полученные в 2013–2014 гг. при непосредственном участии Д.В. Пургиной в изучении инженерно-геологических и гидрогеологических условий на всех этапах изысканий. В процессе работы пробурено 66 скважин (из них четыре горизонтальные и две наклонные), пройдено 20 шурфов, отобрано более 600 проб. При полевых исследованиях грунтов применялось статическое и динамическое зондирование, испытание грунтов методом вращательного среза и штампами (статическими нагрузками). Для получения достоверных оценок фильтрационных параметров проведены две кустовые и пять одиночных опытных откачек. Выполнена гидрогеологическая съемка участка, при этом описано более 50 точек наблюдения. В лабораторных условиях определен полный комплекс физико-механических свойств грунтов. Для грунтов, расположенных выше уровня грунтовых вод, определен коэффициент фильтрации при стандартном уплотнении. Основным методом оценки влияния новых подпорных стенок или изменения условий питания подземных вод являлось численное моделирование с использованием решающего модуля, реализующего алгоритм решения дифференциального уравнения нестандартной плановой фильтрации по методу конечных разностей [1]. В качестве препроцессоров применялись программные комплексы Surfer и AutoCad.

Результаты. Детально изучены гидрогеологические и гидродинамические условия участка изысканий. Создана гидродинамическая численная модель. Составлен прогноз изменения уровня подземных вод при подъеме уровня поверхностных вод в период половодья. Построена карта прогнозного подтопления участка. Изучен подпор подземных вод в существующей стенке. Дана оценка возможности возникновения барражного эффекта при строительстве новых подпорных стенок. Разработаны рекомендации по оптимальному заглублению свайных ростверков на данной территории.

Ключевые слова:

Опытно-фильтрационные работы, математическое моделирование, геоинформационные системы, барражный эффект, подтопление, Modflow, оползень, подпорная стенка, суффозия, крип.

Введение

В настоящее время процесс подтопления захватывает все большие площади городов России [2], что влечет за собой колоссальные потери как в социальном, экономическом, так и в экологическом планах, и призывает нас к более углубленному изучению и усовершенствованию подходов к прогнозу и защите территорий от негативного воздействия подтопления и сопутствующих процессов [3].

В городе Перми можно наблюдать процессы-маркеры, которые указывают на подъем уровня грунтовых вод [4]. Например, появление воды в подвалах зданий [5] (рис. 1) способно нанести непоправимый вред не только отдельным зданиям, но и кварталам жилой застройки. В этом отношении показателен оползень, сошедший в 2012 г. на набережную р. Камы, который снес подпорную стенку высотой около 3,0 м и отрезок двухпутной же-

лезной дороги длиной 32 м, что потребовало экстренной мобилизации сотрудников железной дороги для ликвидации последствий (рис. 2).



Рис. 1. Вода в подвале здания вокзала

Fig. 1. Water in the basement of the building station



Рис. 2. Фрагмент правой части подпорной стенки, восстановленной после схода оползня

Fig. 2. Fragment of the right side of the retaining wall

Менее разрушительные процессы, такие как крип, суффозия [6], можно наблюдать в непосредственной близости от р. Камы (рис. 3, 4). Отмеченные факты позволяют утверждать, что подземные воды на данной территории оказывают разрушающее воздействие на грунтовые массивы и требуют дальнейшего изучения [7].

В 1998 г. «ВерхнекамГИСИЗ» выполнена большая работа по изучению процесса подтопления в городе. Итогом этих исследований явилась схематическая карта распространения опасных геологических процессов, в том числе процесса подтопления, на территории города Перми. При этом большая часть изученных жилых районов была отнесена к территориям благоприятным и условно благоприятным для строительства. Однако выделяются и неблагоприятные для строительного освоения участки. Инженерно-геологическая изученность территорий, даже в границах одного жилого района, является крайне неравномерной и тесно связана с плотностью застройки.

Гидрогеологические условия

В 2013 г. институтом «Сибгипротранспуть» (г. Новосибирск) в Перми проведены инженерно-геологические изыскания, обусловленные необходимостью реконструкции автодорожного путепровода на железнодорожной линии Пермь 1 – Пермь 2. На период обследования (03.08–24.11.2013) были детально изучены инженерно-геологические и гидрогеологические условия территории.

По генезису на участке изысканий выделяются верхнеплейстоценовые аллювиальные отложения II надпойменной террасы р. Камы (aQ_{III}) и отложения коры выветривания песчаников и аргиллитов (P_{sl+ss}), перекрытые с поверхности техногенными отложениями (tQ_{IV}) (рис. 5). По результатам полевых, лабораторных работ и последующей статистической обработки полученных данных, в пределах глубины изучения разреза выделено 59 инженерно-геологических элементов в соответствии с требованиями ГОСТ 20522–2012.



Рис. 3. Пьяный лес вследствие сползания склона (крип)

Fig. 3. Drunken forest due to sliding on the slope (creep)



Рис. 4. Проседание и деформация плит в результате суффозионных процессов

Fig. 4. Subsidence and deformation of the building boards as a result of suffusion processes

Гидрогеологические условия территории определяются следующими особенностями [8]:

- резкой фациальной изменчивостью четвертичных отложений, обуславливающей незакономерное изменение их фильтрационных свойств, наличие в разрезе относительно водоупорных пород, разделяющих водоносные толщи, и наличие песчаных окон, способствующих гидравлической взаимосвязи горизонтов;
- небольшой глубиной вреза современной эрозионной сети, не всегда прорезающей водоупорные толщи, что определяет напорно-безнапорный режим вод четвертичных отложений;
- взаимосвязью вод четвертичных отложений между собой, а также с подземными водами дочетвертичных отложений и водами поверхностных водоемов и водотоков.

В гидрогеологическом разрезе участка работ, в соответствии с её геологическим строением, выделены водоносные комплексы: водоносный комплекс четвертичных отложений (порово-грунтовый) и верхнепермский шешминский (eP_{2sl}) (трещинно-поровый), а также воды, вскрытые в техногенных отложениях. Все воды взаимосвязаны между собой и имеют спорадическое распространение в районе работ.

В границах изучаемого участка положение зеркала грунтовых вод находится на абсолютных отметках – 91,50...104,76 м. Глубина залегания подземных вод изменяется в пределах 0,5...12,2 м. Перепад абсолютных отметок составляет 13,26 м. Фильтрационный поток направлен к руслу реки, а его гидравлический уклон составляет 0,0608 (рис. 5). Уровень воды р. Камы на период изысканий изменялся в диапазоне 87,69...87,72 м. Наивысшие уровни – в районе автодорожного моста – 93,48 м. При данных уровнях часть Камской долины была затоплена, уровни водотоков находились в подпоре от уровней р. Камы на большом протяжении [9].

Методы исследования

Для получения достоверной оценки фильтрационных параметров водоносных горизонтов был выполнен комплекс опытно-фильтрационных работ, необходимых для получения обоснованных прогнозных оценок изменений гидрогеологических условий [10].

Откачки выполнены электронасосом с погружением его на глубину 10...15 м. Перед началом откачки выполнен замер статического (установившегося) уровня воды. Дебит скважин определялся объемным способом с помощью мерной емкости объемом 200 л и секундомера (рис. 6).

Уровень воды замерялся электроуровнеммером. Продолжительность одиночной откачки зависела от стабилизации понижения уровня и изменялась от 15 часов (скважина 18) до 31,5 часов (скважина 25). По окончании откачки выполнено наблюдение за восстановлением уровня воды в скважинах до статического. Продолжительность замеров восстановления варьирует от 16 до 36 часов.

Длительность кустовых откачек составила 72 часа (скважина 25) и 150,5 часов (скважина 100 г), восстановление уровня, соответственно, 76,5 и 98 часов.

По степени или характеру вскрытия все скважины несовершенны. Данные выполненных гидрогеологических работ приведены в табл. 1 и 2. Обработка опытно-фильтрационных работ осуществлялась с использованием типовых расчетных схем, реализованных в программном комплексе ANSDIMAT:

- несовершенной скважины в безнапорном неограниченном пласте;
- водоносный комплекс с перетеканием, перетекание из водоносного пласта с постоянным напором;

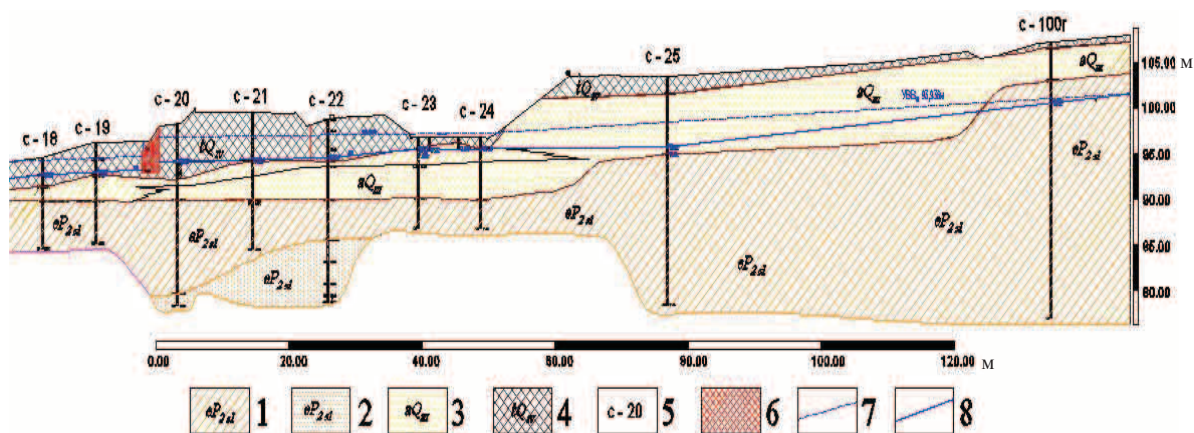


Рис. 5. Гидрогеологический разрез участка: 1 – шешминский комплекс трещиноватых аргиллитов; 2 – шешминский комплекс трещиноватых песчаников; 3 – четвертичные аллювиальные отложения II и III надпойменных террас; 4 – техногенные грунты; 5 – скважина, ее номер; 6 – подпорная стенка; 7 – прогнозный уровень подземных вод; 8 – уровень грунтовых вод на октябрь 2013 г.

Fig. 5. Hydrogeological section area: 1 – sheshminsky complex fractured argillite; 2 – sheshminsky complex fractured sandstones; 3 – quaternary alluvial deposits II and III floodplain terraces; 4 – anthropogenic soils; 5 – well, its number; 6 – retaining wall; 7 – forecasted level of groundwater; 8 – groundwater level in October, 2013



Рис. 6. Площадка проведения откачки из скважины 56: 1 – мерная емкость; 2 – генератор электроэнергии; 3 – скважина; 4 – электроуровнемер (с защитой от дождя)

Fig. 6. Site of the pumping of well no. 56: 1 – dimensional capacity; 2 – generator of electricity; 3 – well; 4 – electrical level gauge (with rain protection)

Таблица 1. Данные опытных работ по одиночным откачкам

Table 1. Data pumping test

Номер скважины Number of wells	Интервал опробования Testing interval от/from–до/to м/м	Параметры откачки Parameters of a pumping test			Средний коэффициент фильтрации, Conductivity м/сут. m/d	Расчетное значение коэффициента фильтрации при $a=0,98$ Conductivity at $a=0,98$ (+)	Расчетное значение коэффициента фильтрации при $a=0,98$ Conductivity at $a=0,98$ (-)
		Дебит Capacity л/с l/s м³/сут m³/d	Понижение Lowering м/м	Удельный дебит Specific capacity л/с·м l/s·m м³/сут·м m³/d·m			
C-18	1,9...10,0 8,1	0,036 3,11	2,05	0,018 1,52	0,33	0,39	0,28
C-25	8,5...25,0 16,5	0,800 69,12	6,45	0,124 10,72	1,36	1,51	1,21
C-56	10,9...15,0 4,1	0,180 15,55	2,18	0,083 7,13	1,57	1,75	1,39
C-59	6,6...10,0 3,4	0,370 31,97	1,20	0,308 26,64	5,94	6,28	5,59
C-100г	8,8...30,2 20,4	0,170 14,69	3,40	0,050 4,32	1,39	1,57	1,22
	Среднее/Mean				2,12	2,30	1,94
	Мин/Min				5,94	6,28	5,59
	Макс/Max				0,33	0,39	0,28

Таблица 2. Проводимость (T , м²/сут.) и уводнепроводность (a , м²/сут.)

Table 2. Transmissibility (T , m²/d) and diffusivity (a , m²/d)

Номер скважины Number of wells	Интервал опробования Testing interval, от/from–до/to м/м	Коэффициент водопроницаемости Coefficient of water conductivity (T , м²/сут.)/ (T , m²/d)	Коэффициент уводнепроводности Diffusivity coefficient (a , м²/сут.)/ (a , m²/d)
C-25	8,5...25,0 7,7	47,69	6960,70
C-100г	8,8...30,2 21,4	29,55	5819,39

- линейный источник: несовершенная скважина в безнапорном водоносном пласте;
- слоистая система: решения Хантуша и Менча.

Эпигнозное моделирование

Ввиду сложных гидрогеологических условий территории оценка изменения уровня подземных вод под влиянием подъема уровня поверхностных вод в р. Каме до 93,936 м, с обеспеченностью 1 %, проведена методом численного гидродинамического моделирования в среде программного комплекса Processing Modflow [11].

При определении внешнего контура фильтрационной модели учитывались следующие обстоятельства: модель области фильтрации должна включать площадь проектируемых инженерных сооружений, прилегающую территорию, а также область потенциального воздействия сооружений на подземные воды [12–14]. Внешние граничные условия должны оказывать минимальное влияние на изменение структуры фильтрационного потока вблизи прогнозируемой площади [15].

В связи с вышеизложенным была выбрана область моделирования, представляющая собой прямоугольник площадью 0,18 км², длина сторон которого 600 и 300 м. Расчетная область фильтрации была разбита на квадратные блоки одинакового размера со стороной квадрата 6 м. Количество блоков по оси X – 100, оси Y – 50, оси Z – 3. Общее количество блоков в модели – $100 \times 50 \times 3 = 150000$ (рис. 7).

Внешние граничные условия модели выбирались исходя из изученных гидрогеологических условий территории, построенной карты гидроизогипс, а также руководствуясь общими принципами по схематизации гидрогеологических условий [16–18].

Внешняя южная граница модели проведена по наиболее приподнятому участку рельефа, являющемуся водоразделом поверхностных и подземных вод. Эта граница вводилась как питающая, т. е. напор потока в них (H) постоянен (ГУ I рода). Западная и восточная границы модели в плане примерно отвечают линиям тока, что позволило отнести их к непроницаемым – на них было реализовано гра-

ничное условие II рода ($Q = \text{const} = 0$) (ГУ II рода). Для северной границы модели (р. Кама) было реализовано граничное условие III рода.

Профильные границы водоносных комплексов и горизонтов задавались через абсолютные отметки подошвы и кровли каждого из них, полученные по результатам буровых работ. Модель в разрезе состоит из трех слоев. Для построения матриц отметок кровли и подошвы соответствующего слоя использовались материалы литологического описания керна скважин, пробуренных осенью 2013 г.

Первый (верхний) модельный слой: соответствует объединенной толще техногенных отложений ($t_{Q_{IV}}$). Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 6,50 м/сут., параметр перетекания (B_1) равен 0,26 м. Подошва слоя представлена кровлей аллювиальных отложений.

Второй модельный слой: отождествляется с аллювиальными отложениями. Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 12,35 м/сут. Параметр перетекания (B_1) равен 1,8 м; подошва слоя на отметке 85,77 м.

Третий модельный слой: имитирует зону активного водообмена. Коэффициент фильтрации по вертикали (K_z) составляет 23,125 м/сут., параметр перетекания (B_1) – 3,2 м; подошва слоя на отметке 85,77 м.

Инфильтрационное питание задавалось на модели в виде однородной матрицы. Для оценки величины питания первого от поверхности водоносного горизонта привлечена среднегодовая сумма атмосферных осадков [19].



Рис. 7. Схематизация граничных условий моделируемого участка

Fig. 7. Schematization of boundary conditions of the modeled area

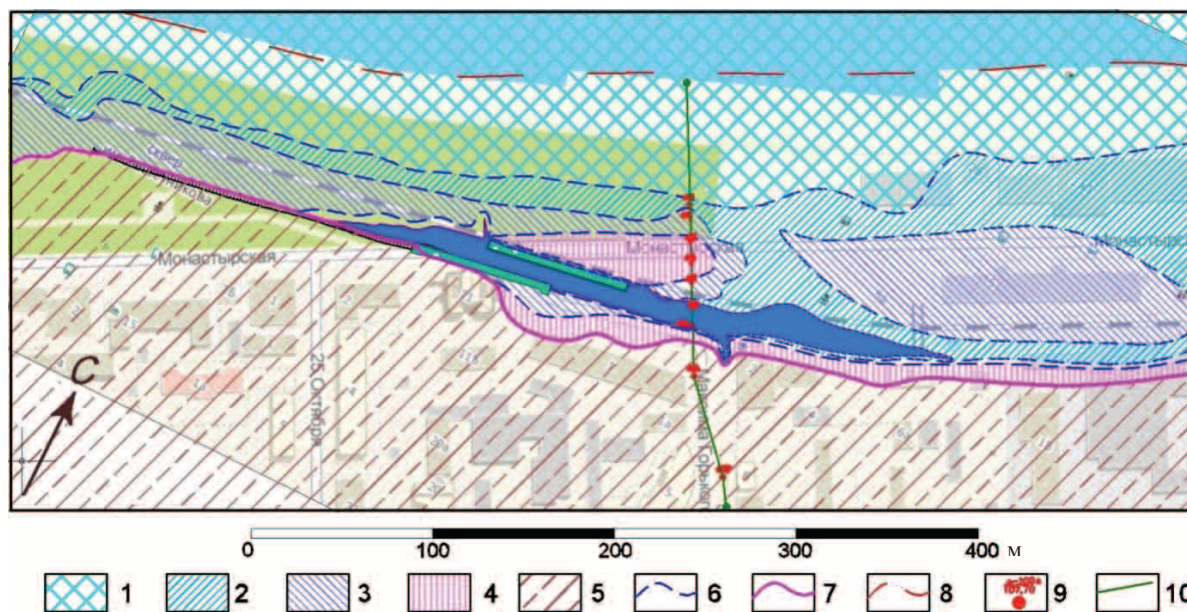


Рис. 8. Схематическая карта опасности и риска изучаемого участка: 1 – подзона непосредственного затопления; мощность зоны аэрации составляет: для 2-й зоны – 0...0,5 м; 3-й зоны – 0,5...2,0 м; 4-й зоны – 2,0...4,0 м; 5-я – зона медленного повышения уровня подземных вод; 6 – границы зон подтопления; 7 – граница между зонами сезонно (ежегодно) подтопляемыми и медленного повышения уровня подземных вод; 8 – граница р. Камы на 26.10.2013 г.; 9 – скв; 10 – линия разреза

Fig. 8. Sketch map of the dangers and risks of the studied area: 1 – subzone of direct flooding; power aeration zone is zone 2 – 0...0,5 m; zone 3 – 0,5...2,0; zone 4 – 2,0...4,0; 5 – zone of a slowly increase of the groundwater level; 6 – border areas of flooding; 7 – boundary between the zones of seasonal (annual) flooding risk and the slow increase of the groundwater level; 8 – border of the river Kama, 10 October 2013; 9 – well; 10 – cutting line

Калибровка фильтрационной модели по превышению уровня воды в р. Кама заключалась в уточнении значений проводимости подрусловых отложений и коэффициентов фильтрации аллювиальных отложений в прилегающих к водотоку областям.

В результате калибровки модели по основным критериям соответствия реальных и модельных значений (напоров в скважинах) была решена обратная фильтрационная задача. На численной модели было получено поле распределения естественных напоров, по результатам анализа которого Д.В. Пургиной построена карта опасности и риска подтопления изучаемого участка (рис. 8).

Вся исследованная территория была разделена на две основные зоны: сезонного (ежегодного) подтопления и медленного (многолетнего) повышения уровня подземных вод. В свою очередь в первой зоне были выделены четыре подзоны, в которых прогнозируется положение уровня подземных вод в соответствии с максимально возможным положением уреза р. Камы. Первая – непосредственного затопления (вода выходит на поверхность при нулевой мощности зоны аэрации), вторая – мощность зоны аэрации составляет 0,0...0,5 м, третья – мощность зоны аэрации изменяется в пределах 0,5...2,0 м, четвертая – мощность зоны аэрации достигает 2,0...4,0 м.

Анализ построенных гидроизогипс на гидрогеологической карте и уровней грунтового потока

на инженерно-геологических разрезах показывает наличие явно выраженного подпора подземных вод [20] вследствие перекрытия фильтрационного потока подземными частями существующих подпорных стенок и жилых зданий с глубоким заложением фундамента без дренажных канав. Отмечен подпор воды у здания вокзала с резким снижением уровня воды за зданием (в подвале зафиксировано стояние воды). Подпор подземных вод наблюдается у существующих подпорных стенок, расположенных южнее и севернее земляного полотна и у стены путепровода (рис. 9).

Сгущение изолиний на подходе к подпорной стенке, расположенной южнее земляного полотна, достигает 2...3 м с уклоном 0,5 и резким снижением уровня воды за ней. Подпор не зафиксирован на тех участках, где состояние кирпичной кладки подпорных стенок нарушено и вода имеет возможность циркулировать через конструкцию фундамента.

Прогнозное моделирование

Количественная оценка прогнозной величины подъема уровня подземных вод при строительстве новых подпорных стенок [21] (прогноз подпора грунтовых вод) требует знания фильтрационных показателей всех разновидностей техногенных грунтов, включая породы зоны аэрации. Для тех разновидностей песчаных и глинистых грунтов,

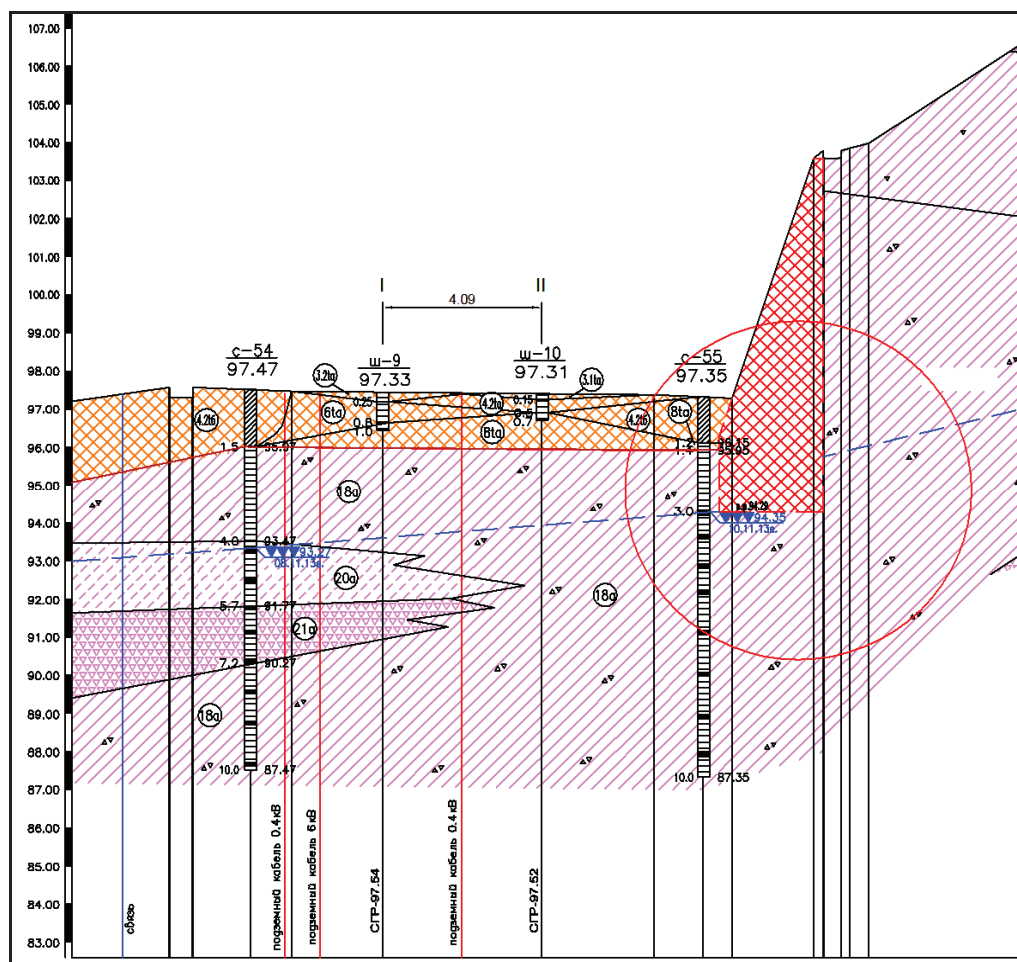


Рис. 9. Фрагмент инженерно-геологического разреза. Проявление барражного эффекта в существующей стенке

Fig. 9. Detail of engineering geological section. Manifestation of the barrage effect in an existing wall

которые в период обследования находились выше уровня подземных вод, использованы лабораторные методы определения коэффициента фильтрации.

В связи с тем, что при сооружении подпорных стенок будет происходить уплотнение грунтов, коэффициенты фильтрации определялись: для песчаных грунтов – методом стандартного уплотнения при максимальной плотности и оптимальной влажности; для глинистых грунтов – методом расчета при выполнении консолидационных испытаний (ГОСТ 12248–2010 п. 5.4.5) через установленные характеристики фильтрационной консолидации.

Освоение подземного пространства для укрепления склона при строительстве новых подпорных стенок вызывает опасность развития процессов техногенного подтопления за счёт возникновения барражного эффекта при заложении подошвы свайного ростверка ниже естественного уровня подземных вод. Для исключения такой возможности необходимо обосновать оптимальную глубину заложения подошвы свайного ростверка подпорных стенок. Оценить величину изменения уровня

подземных вод при строительстве подпорных стенок, в силу очевидной сложности гидрогеологических условий, позволяют методы численного моделирования. Традиционные аналитические гидродинамические расчёты в этом случае малоэффективны, так как не позволяют полноценно учесть сложный характер взаимодействия граничных условий со слоистым строением водовмещающей толщи.

На этапе схематизации гидрогеологических условий принята усредненная абсолютная отметка залегания уровня подземных вод вблизи проектируемых подпорных стен, равная 94,5 м.

Прогноз уровня подземных вод проектируемых подпорных стенок выполнялся для двух вариантов проектных решений, отличающихся отметками заложения подошвы свайного ростверка. По первому варианту абсолютная отметка подошвы фундамента составила 92,0 м, а по второму варианту соответствовала отметке 94,5 м.

Другие параметры проектных подпорных сооружений определялись следующими техническими условиями:

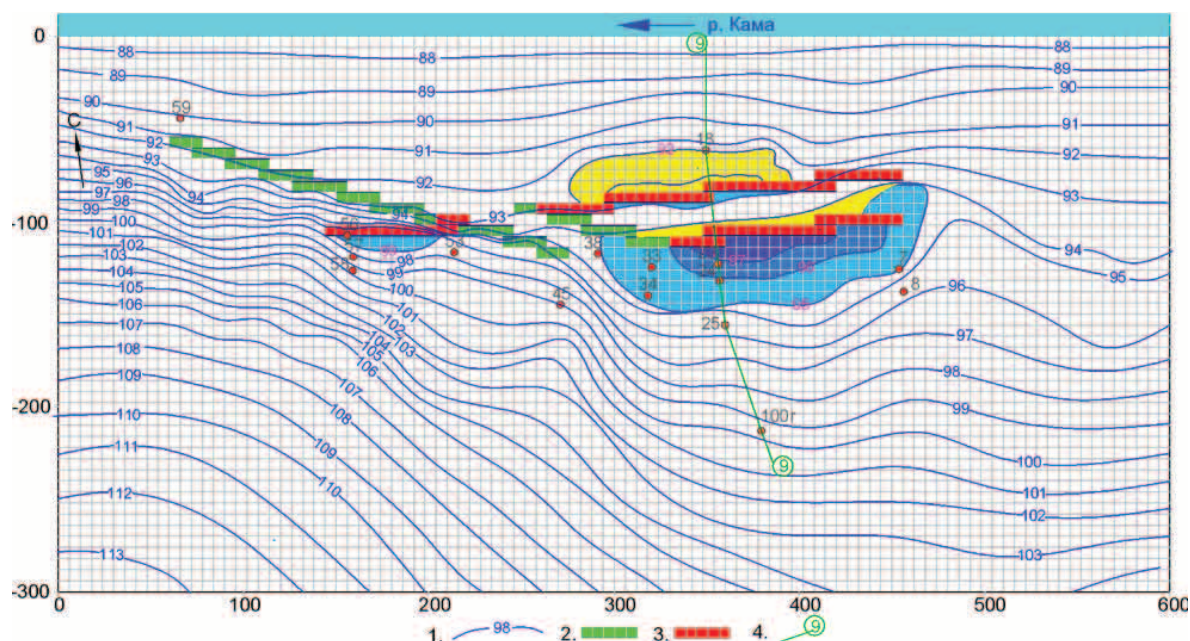


Рис. 10. Прогнозная модель изменения уровня подземных вод при заглублении фундамента проектных подпорных стенок до отметки 92,0 абс. м: 1 – линии равных напоров; 2 – существующие подпорные стенки; 3 – проектные подпорные стенки; 4 – линия разреза

Fig. 10. Forecast model of the changes in the level of groundwater at the burial of the foundation design of retaining walls to the level of 92.0 abs. m: 1 – lines of equal pressures; 2 – existing retaining walls; 3 – design retaining walls; 4 – cutting line

1. Подпорные стенки принимаются непроницаемыми, а сами строения – полностью гидроизолированными. Численная реализация данного условия на модели соответствует внутренним границам II рода ($Q=0$), пространственно совпадающим с внешними контурами подпорных стенок.
2. Отсутствуют дренажные системы любого типа (в том числе и нагорные каналы). Данное условие заложено для создания повышенного запаса надежности прогнозных расчётов, поскольку за основу были взяты напоры, отвечающие естественному режиму подземных вод.

Прогноз изменения уровня для первого варианта проекта подпорной стенки. Оценивается величина изменения уровня подземных вод при заглублении подошвы свайного ростверка до абсолютной отметки 92,0 м, что соответствует погружению свай в водоносные отложения аллювия и элювия на 2,5 м. Результаты моделирования показывают, что данный вариант строительства приводит к некоторому изменению структуры фильтрационного потока. Это выражается в подъеме уровня подземных вод возле сооружений. Так, вблизи подпорной стенки № 1 наблюдается повышение уровня с юго-восточной стороны до 4 м (рис. 10). Препяды фильтрационному потоку также создают и остальные рассматриваемые подпорные стенки, что приводит к повышению уровня вблизи них на 0,6...1,2 м.

Для предотвращения выявленного роста уровня подземных вод необходимо организовать воз-

можность прохождения фильтрационного потока под подошвой свайного ростверка, не перекрывая аллювиальные и элювиальные отложения, которые обладают наиболее высокими фильтрационными свойствами. Такого результата можно достичь, уменьшив заглубление подошвы свайного ростверка.

Прогноз изменения уровня для второго варианта проекта подпорной стенки. Выполнена оценка величины возможного превышения напоров относительно естественных условий при заглублении подошвы ростверка до абсолютной отметки 94,5 м, равной усредненной абсолютной отметке залегания уровня подземных вод вблизи проектируемых подпорных стенок (рис. 11).

При заглублении подошвы свайного ростверка до абсолютной отметки 94,5 м происходит незначительное изменение картины фильтрационного потока. Подъем уровня подземных вод возле подпорных стенок не превышает 0,3...0,5 м относительно их естественного положения, восстановленного по результатам эпигнозного моделирования.

Выводы

1. В результате инженерно-геологических и гидрогеологических исследований получен новый фактический материал, который позволил количественно оценить физико-механические характеристики стратиграфо-генетических комплексов: верхнеплейстоценовых аллювиальных отложений II надпойменной террасы р. Камы (aQ_{III}) и отложений коры выветрива-

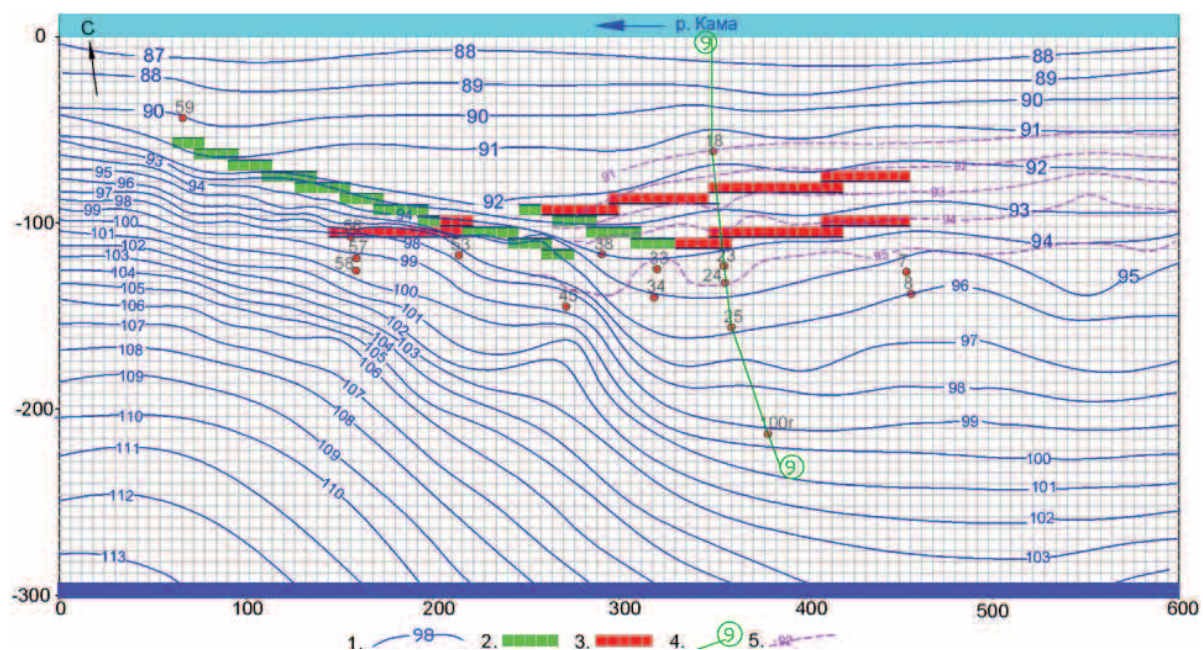


Рис. 11. Прогнозная модель изменения уровня подземных вод при заглублении фундамента проектных подпорных стенок до отметки 94,5 абс. м: 1 – линии равных напоров; 2 – существующие подпорные стенки; 3 – проектные подпорные стенки; 4 – линия разреза; 5 – изолинии естественного потока

Fig. 11. Forecast model of the changes in the level of groundwater at the burial of the foundation design of retaining walls to the level of 92.0 abs. m: 1 – lines of equal pressures; 2 – existing retaining walls; 3 – design retaining walls; 4 – cutting line; 5 – isolines of the natural flow

- ния песчаников и аргиллитов (P_2sl+ss), перекрытых с поверхности техногенными отложениями (tQ_{IV}).
- По результатам обработки опытно-фильтрационных работ установлены значения коэффициентов фильтрации, водопроницаемости и пьезопроводности водовмещающих пород.
 - Разработана гидродинамическая модель в среде программного комплекса PMWIN, использованная для прогноза изменения уровня подземных вод с учетом максимально возможных паводковых отметок (93,94 м) поверхностных вод в реке Кама. Модель позволяет получить распределение напоров под влиянием проектируемых подпорных стенок.
 - Построена карта опасности и риска подтопления изучаемого участка с учетом требований СП 11–105–97 (часть 2). Вся территория разделена на две зоны: сезонного (ежегодного) подтопления и медленного (многолетнего) повышения уровня подземных вод. В свою очередь, в первой зоне выделены 4 подзоны, в которых прогнозируется положение уровня подземных вод в соответствии с максимальным уровнем паводковых вод в Кама. Первая зона имеет более дробное деление на подзоны, выделенные по мощности зоны аэрации и представленные четырьмя грациями: 0 м; 0,0...0,5 м; 0,5...2,0 м; 2,0...4,0 м. С целью районирования территорий и условий строительного освоения на участках повышенного риска требуются до-

полнительные природоохранные мероприятия с удорожанием строительства.

- По результатам анализа гидрогеологического разреза документально зафиксировано локальное повышение уровня подземных вод вдоль фундамента одной из подпорных стенок и определены участки, на которых предполагается изменение физических свойств грунтового массива.
- В стационарной постановке дан прогноз изменения уровня подземных вод методом численного моделирования для разных вариантов заглубления фундамента подпорных стенок. Первый вариант заглубления фундамента до глубины 92,0 абс. м приводит к некоторому подъему уровня подземных вод. Во втором случае (при меньшем заглублении фундамента до отметки 94,5 абс. м) подъем уровня подземных вод за счет влияния подпорных стенок не превышает 0,3...0,5 м относительно естественных условий.
- На основании численного моделирования сформулированы предложения по проектированию свайных оснований подпорных стенок. Рекомендуется выбирать заглубление подошвы свайного ростверка проектируемых подпорных стенок с таким расчетом, чтобы не перекрывать разрез песчано-гравийных аллювиальных отложений с абсолютной отметкой кровли 94,5 м. В этом случае проявления барражного эффекта свайных оснований практически отсутствуют, а подтопление основной площадки земельного полотна не развивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. Геология, поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. – 2002. – Т. 305. – Вып. 6. – С. 348–365.
2. Попов В.К., Лукашевич О.Д., Коробкин В.А. Техногенное подтопление: оценка, развитие, превентивные меры // Сб. научных трудов «Город: прошлое, настоящее, будущее». – Иркутск, 2004. – С. 24–27.
3. Муфтахов А.Ж. Гидродинамические основы прогноза подтопления промплощадок и фильтрационные расчеты защитного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1975. – 44 с.
4. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Гидрогеологические условия и процессы подтопления территории г. Томска // Подземные воды юга Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во «Наука СО», 1987. – С. 146–153.
5. Последствия подтопления застроенных территорий и способы их дренирования / Н.П. Куранов, А.Ж. Муфтахов А.П. Шевчик, И.М. Бывальцев // Итоги науки и техники: Гидрогеология. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1991. – Т. 13. – 130 с.
6. Гавшина З.П., Дзекцер Е.С. Условия подтопления грунтовыми водами застраиваемых территорий. – М.: Стройиздат, 1982. – 116 с.
7. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология: учебник для вузов / С.Л. Шварцев. – М.: Недра, 1996. – 423 с.
8. Бурцев Ю.Г., Байдин В.Г., Назаров Н.Н. Отчет о результатах работ по изучению динамики инженерно-геологических процессов на берегах Камского и Воткинского водохранилищ в 1977–78 гг. – Пермь: Сылвенская гидрогеологическая партия, 1978. – 212 с.
9. Гавич И.К. Гидрогеодинамика: учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 349 с.
10. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, И.С. Зекцер, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин, Е.В. Пиннекер, С.С. Бондаренко, Л.В. Боровский, А.А. Дзюба. – Новосибирск: Наука, 1983. – 242 с.
11. Wen-Hsing C., Kinzelbach W. 3D-Groundwater modeling with PMWIN. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. – 346 p.
12. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. – Киев: ВШ, 1976. – 192 с.
13. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. – М.: Наука, 1971. – 266 с.
14. Лехов М. Гидрогеологические изыскания и моделирование в городском строительстве: критические комментарии // Инженерные изыскания. – 2013. – № 1. – С. 24–29.
15. Мироненко В.А. Динамика подземных вод: учебник. – М.: МГУ, 2001. – 519 с.
16. Лебедева Н., Самохина А. Цифровые картографические основы для Информационных систем градостроительной деятельности // ArcReview. – 2006. – Вып. 3 (38). – С. 14.
17. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control // J. Irrigation and Drain. Eng. – 1989. – V. 115. – № 4. – P. 588–607.
18. Blower T., Simpson B. Rising ground-water levels beneath London // Struct. Surv. – 1988. – V. 6. – № 3. – P. 229–232.
19. Пособие к СНиП 2.06.15–85. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2697 (дата обращения: 20.10.2015).
20. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam // Resource-Efficient Technologies. – 2015. – № 1. – P. 80–89.
21. Шестаков В.М. Динамика подземных вод: учебник. – М.: МГУ, 1979. – 369 с.

Поступила 28.10.2015 г.

UDC 624.131

MODELING HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS FOR ANTILANDSLIDE MEASURES JUSTIFICATION ON THE PLOT OF THE KAMA RIVER EMBANKMENT IN PERM

Darya V. Purgina,

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

Lyudmila A. Strokova,

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

Konstantin I. Kuzevanov,

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

The topic is relevant due to the necessity of forecast ways improvement and protection of the territories against flooding and the accompanying processes. Civil construction, urban density, underground utility system, change of a natural relief cardinaly changes the natural geological environment within the developed territory. New layers of industrial temporary waters are developed under several factors (building development, rocks contraction under the stress of construction engineering facilities).

The objective of the present research is to study geological, hydrogeological and hydrodynamic conditions for a long-term change forecast for construction of additional retaining walls along the Kama river embankment and short-term change forecast – for high water.

Research technique. Basic data for the research are the field materials of JSC Sibgiprottransput received in 2013–2014 with the direct involvement of Darya V. Purgina in engineering-geological and hydrogeological conditions studying at all stages of the research. In the course of the work 66 wells are drilled (including four horizontal and two inclined wells), 20 holes are trepanned, more than 600 samples are selected. Static and dynamic penetration test, rotational shear soils testing, static plate load test were used in field soil investigation. Two cluster and five single pumping tests were carried out for reliable estimation of filtration characteristics. The hydrogeological survey was completed, more than 50 observation points were described. The full complex of rock mechanics is carried out in laboratory setting. For the soils, lying above the groundwater level, the filtration coefficient is defined by standard consolidation. The main method of an assessment of influence of new retaining walls or changes of conditions of groundwater recharge was a numerical modeling with the use of the decisive module realizing the algorithm of the solution of the differential equation of a non-standard planned filtration according to the method of final differences [1]. As preprocessors the Surfer and AutoCad software systems were applied.

The results. Hydrogeological and hydrodynamic conditions of a research site are studied in detail, the hydrodynamic numerical model is created, the forecast of underground water levels change at surface water level rise at high-water season is made, predictive map of flooding area is built, groundwater backwater in the existing wall is investigated, the possibility of a barrage effect in the construction of new retaining walls is assessed, recommendations for optimal penetration of the pile grillage on the area are given.

Key words:

Experimental filtration works, math modeling, geoinformation systems, barrage effect, underflooding, Modflow, landslide, supporting wall, suffusion, creep.

REFERENCES

1. Bukaty M.B. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya resheniya gidrogeologicheskikh zadach [Software development for solving hydrogeological problems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2002, vol. 305, iss. 6, pp. 348–365.
2. Popov V.K., Lukashovich O.D., Korobkin V.A. Tekhnogennoe podtoplenie: otsenka, razvitie, preventivnye mery [Induced flooding: assessment, development, preventive measures]. *Sb. nauchnykh trudov «Gorod: proshloe, nastoyashchee, budushchee»* [Proc. City: past, present, future]. Irkutsk, 2004. pp. 24–27.
3. Muftakhov A.Zh. *Gidrodinamicheskie osnovy prognoza podtopleniya promyshlennyykh i fil'tratsionnykh raschetov zashchitnogo drenazha v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh*. Avtoref. Dis. Dokt. nauk [Fundamentals of the hydrodynamic prediction of flooding of industrial sites and seepage calculations protective drainage in complex hydrogeological conditions. Author's Abstract Diss. Dr.]. Moscow, 1975. 44 p.
4. Pokrovskiy D.S., Kuzevanov K.I. *Gidrogeologicheskie usloviya i protsessy podtopleniya territorii g. Tomska* [Hydrogeological conditions and processes of underflooding of the territory of Tomsk]. *Podzemnye vody yuga Zapadnoy Sibiri* [Groundwater in the South of Western Siberia]. Novosibirsk, Nauka SO Publ., 1987. pp. 16–153.
5. Kuranov N.P., Muftakhov A.Zh., Shevchik A.P., Byvaltsev I.M. *Posledstviya podtopleniya zaostroennykh territoriy i sposoby ikh drenirovaniya* [The consequences of flooding residential areas and their drainage]. Moscow, VINITI Publ., 1991, vol. 13. 130 p.
6. Gavshina Z.P., Dzektser E.S. *Usloviya podtopleniya gruntovymi vodami zastraivayemykh territoriy* [Conditions of groundwater flooding of built up areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 116 p.
7. Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1996. 423 p.
8. Burtsev Yu.G., Baydin V.G., Nazarov N.N. *Otchet o rezultatakh rabot po izucheniyu dinamiki inzhenerno-geologicheskikh protsessov na beregakh Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch v 1977–1978* [A report on the results of studies on the dynamics of engineering-geological processes on the banks of the Kama and Votkinsk reservoirs in 1977–78]. Perm, Sylvenskaya gidrogeologicheskaya partiya Publ., 1978. 212 p.
9. Gavich I.K. *Gidroeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 349 p.
10. Gavich I.K., Zektser I.S., Kovalevskiy V.S., Yazvin L.S., Pinneker E.V., Bondarenko S.S., Borevskiy L.V., Dzyuba A.A. *Osnovy gidrogeologii. Gidroeodinamika* [Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 242 p.

11. Wen-Hsing C., Kinzelbach W. *3D-Groundwater modeling with PMWIN*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. 346 p.
12. Zhernov I.E., Pavlovets I.N. *Modelirovanie filtratsionnykh protsessov* [Modeling of filtration processes]. Kiev, High school Publ., 1976. 192 p.
13. Zhernov I.E., Shestakov V.M. *Modelirovanie filtratsii podzemnykh vod* [Modeling of underground water filtration]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 266 p.
14. Lekhov M. *Gidrogeologicheskie izyskaniya i modelirovanie v gorodskom stroitelstve: kriticheskie kommentarii* [Hydrogeological survey and modeling in urban development: critical comments]. *Engineering survey*, 2013, no. 1, pp. 24–29.
15. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of groundwater]. Moscow, MGG University Publ., 2001. 519 p.
16. Lebedeva N., Samokhina A. *Tsifrovye kartograficheskie osnovy dlya Informatsionnykh sistem gradostroitelnoy deyatelnosti* [Digital cartographic basis for Information systems urban planning]. *ArcReview*, 2006, vol. 3 (38), p. 14.
17. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control. *J. Irrigation and Drain. Eng.*, 1989, vol. 115, no. 4, pp. 588–607.
18. Blower T., Simpson B. Rising ground-water levels beneath London. *Struct. Surv.*, 1988, vol. 6, no. 3, pp. 229–232.
19. *Posobie k SNiP 2.06.15–85. Prognozy podtopleniya i raschet drenazhnykh sistem na zastraivaemykh i zastroennykh territoriyakh* [Manual for SNiP 2.06.15–85. Forecasts of flooding and calculation of drainage systems in built up areas and those under construction]. Available at: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2697/ (accessed 20 October 2015).
20. Phi H.T., Strokova L.A. Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Resource-Efficient Technologies*, 2015, no. 1, pp. 80–89.
21. Shestakov V.M. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of groundwater]. Moscow, Moscow State University Publ., 1979. 369 p.

Received: 28 October 2015.

УДК 621.18–182.2

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ ВЫСОКОВЛАЖНОГО НЕПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРНОЙ ТОПКЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тайлашева Татьяна Сергеевна,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: taylasheva@tpu.ru

Гиль Андрей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: angil@tpu.ru

Воронцова Елена Сергеевна,

аспирант кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ves@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена рядом проблем топливно-энергетического комплекса, в первую очередь истощением запасов проектного топлива для многих тепловых электрических станций, возрастанием затрат на привозное топливо, включая эксплуатационные издержки, а также задачами ориентирования региона на использование своих собственных возможностей.

Цель исследования: предпроектный подбор характеристик высоковлажного бурого угля Таловского месторождения Томской области, при которых возможно судить о реализации его эффективного сжигания в котлах большой мощности посредством проведения численного моделирования процессов в топке котла при нескольких вариантах влажности исходного топлива, а также о необходимости реконструкции системы пылеприготовления и сохранении существующей компоновки горелочных устройств. Сравнение полученных результатов при представлении физико-химических процессов, протекающих при сжигании проектного и непроектного топлива, способствует развитию базы для проведения исследований при существующих технологиях сжигания твердого топлива в энергетических котлах.

Методы исследования: численное моделирование в специализированном пакете прикладных программ FIRE 3D на основе эйлера-лагранжева подхода, метод конечных разностей, «к-ε» модель турбулентности, P1-приближение метода сферических гармоник, нормативный метод теплового расчета котлов.

Результаты: получены распределения температурных полей в топочном объеме, концентрации кислорода, твердых частиц, аэродинамическая структура потока. Создана основа для сравнительных исследований существующей технологии сжигания твердого топлива применительно к местному низкосортному углю.

Выводы: наиболее эффективное сжигание достигается при влажности рабочей массы таловского угля на уровне 30 %, что необходимо учитывать при исследовании различных технологий и продуктов сжигания.

Ключевые слова:

Бурый уголь, непроектное топливо, паровой котел, численное моделирование, топочный объем, аэродинамика, сравнительные исследования.

Введение

Спрос на твердое органическое топливо для теплоэнергетики имеет тенденцию к устойчивому росту [1]. В основе надежной и эффективной эксплуатации любой тепловой электростанции (ТЭС) лежит качество поставляемого топлива и своевременность его поставки. Отклонение свойств топлива от проектно-заявленных приводит к нарушению режимов работы как основного, так и вспомогательного оборудования электростанции.

Наряду с общим ростом потребления ископаемых энергетических ресурсов [2] для отдельных ТЭС возникает проблема истощения запасов так называемых проектных топлив, т. е. топлив, на использование которых проектировались в свое вре-

мя эти электростанции. В большинстве случаев такая ситуация приводит к выбору альтернативных месторождений, в особенности расположенных вблизи энергообъектов и обеспечивающих экономическую целесообразность перевода энергетического оборудования на организацию сжигания замещающего топлива [3]. Такое непроектное топливо не всегда является высококачественным и зачастую не способно заместить проектное в своем исходном виде, поэтому для его эффективного и экологичного использования [4] необходимы не только предварительные исследования теплотехнических свойств угля [5], но и сопровождающие на весь период поставки. С аналогичными задачами приходится сталкиваться при экспертной оценке

возможности сжигания топлива, поступающего на предприятия энергетики с нарушениями условий поставки (в частности, несоответствие топлива по качеству) [6]. Оценка возможности использования непроектного топлива требует особого внимания не только к предъявляемым характеристикам, но и к прогнозированию проявления свойств угля в условиях сжигания, что наиболее оперативно достигается средствами компьютерного моделирования [7–9].

Объект и методы исследования

На территории Томской области открыто несколько месторождений бурого угля, из них наиболее детально изученным является Таловское месторождение [10], расположенное вблизи г. Томска. Уголь этого месторождения можно рассматривать альтернативой проектному топливу для томских электростанций [11], которые с момента ввода в эксплуатацию работают на каменном угле кузнецких месторождений. В ближайшей перспективе [12] Кузнецкий угольный бассейн останется базовым для добычи твердого топлива, но при этом планируется освоение новых месторождений Сибири и Дальнего Востока в силу истощения запасов твердого топлива.

Бурый уголь Таловского месторождения в связи с геологическими особенностями залегания угольного пласта имеет теплотехнические характеристики, изменяющиеся в широком диапазоне из-за близости грунтовых вод, поэтому как энергетическое топливо значительно уступает широко известным и изученным углям. Особенности теплотехнических характеристик угля, а также отсутствие опыта сжигания в котельных установках ТЭС делают актуальным вопрос подготовки данного угля к сжиганию [13, 14], что формулирует цель исследования – выбор оптимальных характеристик рабочей массы, при которых можно судить как о возможности, так и об эффективности его использования в котлах большой мощности.

Объектом исследования является однобарабанный П-образный котел БКЗ–220–100 с топочной камерой открытого типа призматической формы, имеющей размеры по осям труб 6656×9536 мм. Для организации топочного процесса она оборудована шестью вихревыми горелками, расположенными на боковых стенах треугольником вершиной вниз.

В качестве расчетных топлив приняты таловский уголь с рабочей влажностью в нескольких вариантах в диапазоне до 50 % и кузнецкий уголь, характеристики которых представлены в таблице.

В последнее время исследования крупных физических объектов проводятся с помощью численного моделирования, являющегося одним из наиболее распространенных и экономичных способов оценки процессов, протекающих в тепломеханическом оборудовании [15–18]. Авторами проведены исследования с использованием специального пакета прикладных программ FIRE 3D, предназна-

ченного для моделирования топочных устройств энергетических котлов [19, 20]. Пакет позволяет выполнять многовариантные исследования на основе математического моделирования и обрабатывать полученные результаты в графическом виде. Результаты можно представлять как в двухмерных, так и трехмерных отображениях с возможностью установки любого сечения по координатам и выводить результаты расчетов по исследуемым процессам.

Таблица. Теплотехнические характеристики исследуемых углей

Table. Burning characteristics of investigated coal

Характеристика Characteristic	Таловский уголь Talovsky coal			Кузнецкий уголь Kuznetsk coal
	1	2	3	
W_i , %	30,00	40,00	50,70	13,80
A_i , %	25,80	22,20	18,20	14,40
Q_i , ккал/кг kcal/kg	3096	2570	2007	5120
C , %	28,60	24,40	20,08	55,70
H , %	3,00	2,60	2,10	4,00
O , %	12,10	10,30	8,50	9,90
S , %	0,10	0,10	0,06	0,30
N , %	0,40	0,40	0,36	1,90

Численные исследования для сжигания таловского угля проведены с учетом изменений в системе пылеприготовления, но без изменения компоновки и типа горелочных устройств, т. е. при отсутствии какой-либо реконструкции собственно котла. Расход топлива выбирался по результатам поверочного теплового расчета котельного агрегата [21].

Обсуждение результатов

Визуализация расчетных результатов по характеристикам топочной среды в поперечном сечении топки, проходящем по оси горелок нижнего яруса, приведена для трех значений влажности таловского угля и для проектного топлива на рис. 1–3.

Аэродинамическая структура топочной среды, представленная на рис. 1, в целом соответствует схеме сжигания. При сжигании бурого таловского угля разной влажности картина имеет общие особенности – формирование скоростного потока в центральной части топочной камеры, который по мере восхождения расширяется вплоть до экранов. В зоне на уровне непосредственно над горелочным поясом средняя скорость основного потока не превышает 9 м/с. При этом наблюдается отклонение скоростного потока, образуемого нижним ярусом горелок, что вызвано созданием большего давления в области столкновения потоков от верхних горелок, вследствие чего поток от нижних горелок становится более концентрированным, но по мере удаления от амбразуры его структура восстанавливается и он устремляется вверх.

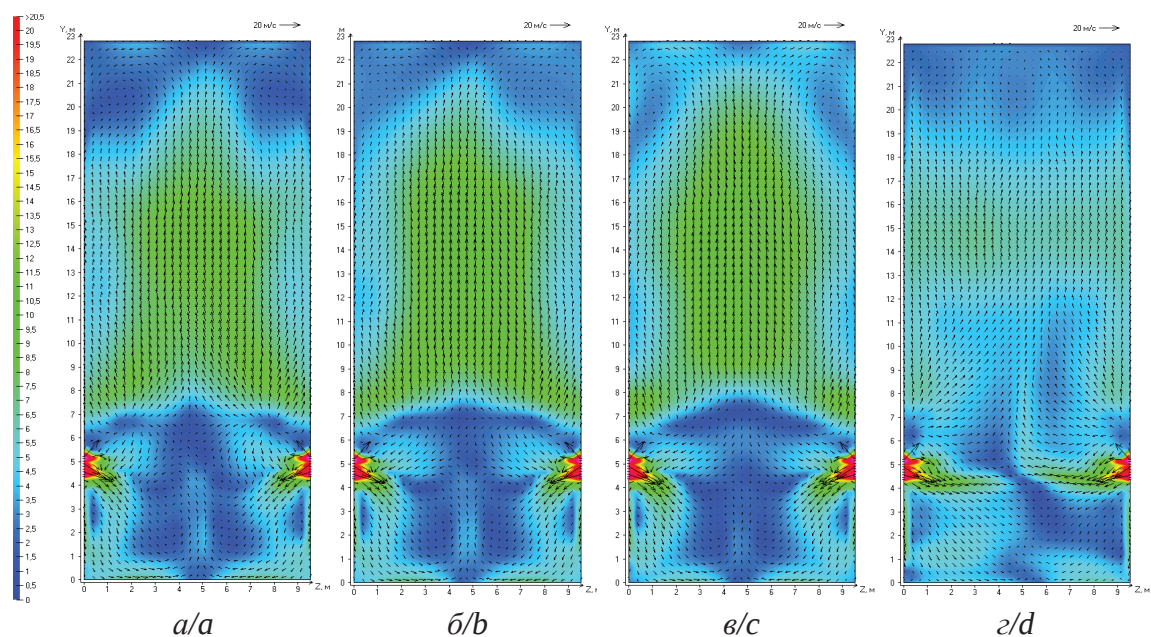


Рис. 1. Аэродинамическая структура потока в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)

Fig. 1. Aerodynamic structure of the flow in cross-section of the furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)

При сжигании кузнецкого угля наблюдается более равномерное распределение скорости потока по сечению топочной камеры. Несмотря на наличие аэродинамического выступа, который призван способствовать выравниванию расхода продуктов сгорания на выходе из топки, в этой области на-

блюдаются застойные и слабозавихренные локальные зоны, примыкающие к потолочному экрану.

Распределение температурных полей, представленное на рис. 2, зависит от теплотехнических характеристик топлива, которые определяют концентрацию окислителя в зоне горения. При влажности

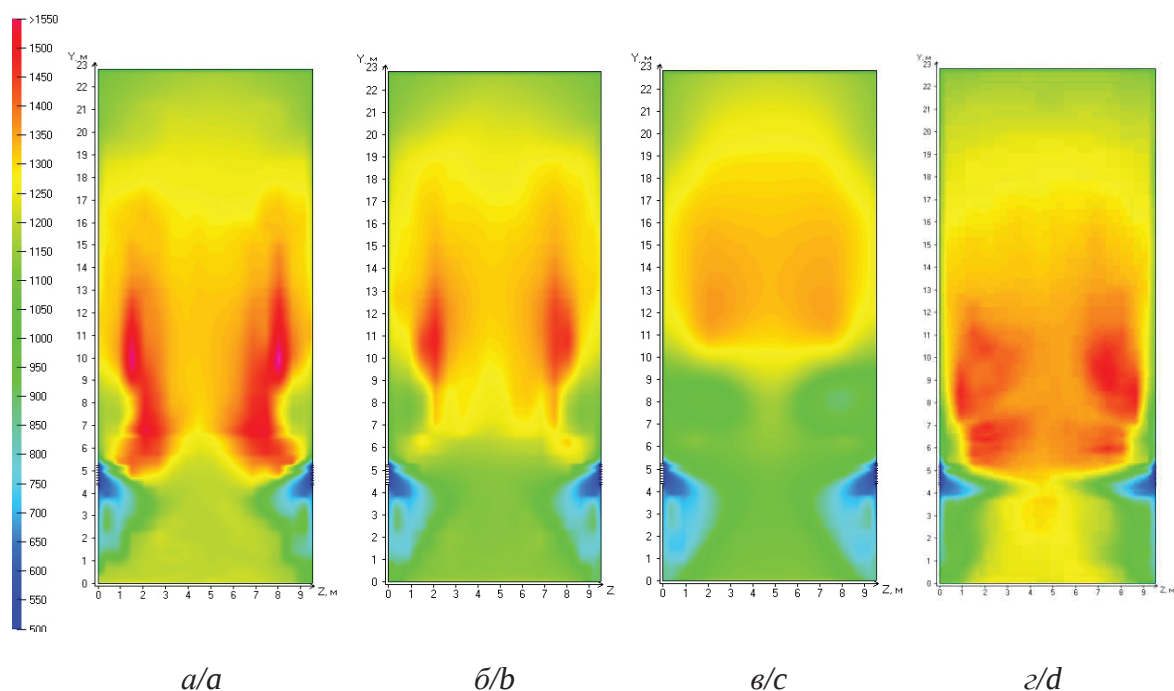


Рис. 2. Распределение температур (K) в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)

Fig. 2. Allocation of temperatures (K) in cross-section of furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)

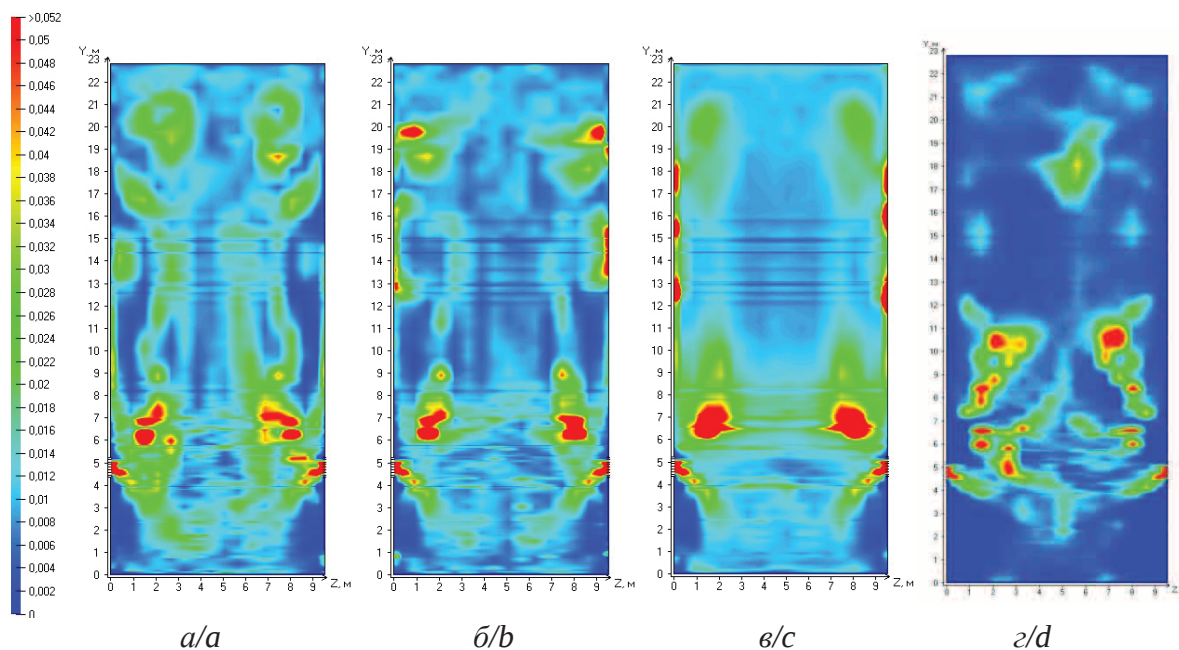


Рис. 3. Концентрация частиц (кг/кг) в поперечном сечении топки по оси горелок нижнего яруса при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (а); 40 % (б); 50 % (в) и кузнецкого угля (г)

Fig. 3. Concentration of solids (kg/kg) in cross-section of furnace along the axis of the lower tier burners while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)

таловского угля 50 % (рис. 2, в) наблюдается задержка процессов воспламенения и горения топлива из-за заниженной концентрации окислителя. Топливо с такими параметрами требует более высоких затрат тепла на прогрев угольной пыли и испарения из нее влаги. В связи с этим область максимальной температуры смещается в верхнюю часть топочного объема и имеет значения 1250–1350 К, тогда как в холодной воронке и на уровне горелочного пояса – в пределах 900–1250 К.

Высокая реакционная способность таловского угля в более подсушенном состоянии обеспечивает интенсивное выгорание частиц, за счет чего создается благоприятная для надежной работы конвективных поверхностей нагрева температура на выходе из топки – не более 1300 К (рис. 2, а, б).

Распределение угольных частиц в объеме топочной камеры (рис. 3) дополняет информацию для оценки условий сжигания топлива.

На картине концентрационных полей явно прослеживается влияние аэродинамической структуры. Максимальные концентрации, естественно, имеют место в зоне горелок, как при сжигании таловского, так и кузнецкого угля. Выше уровня расположения горелок, при уже установившейся аэродинамике и достаточном температурном режиме, концентрация частиц снижается. При этом наблюдается скопление частиц в пристеночных областях боковых стен, где скоростной режим несколько ниже. Скопление частиц наблюдается также в застойной зоне и в области возникновения потолочно-фронтальных вихрей, а в зоне холодной воронки скопление частиц при сжигании талов-

ского угля приходится на скаты фронтального и тыльного экранов (рис. 3, а–в).

Среднеинтегральные значения концентрации кислорода и температур по горизонтальным сечениям в зависимости от вертикальной координаты – высоты топочной камеры – представлены на рис. 4.

Максимальное значение концентрации кислорода (рис. 4, а) имеет место на выходе из горелочных устройств. Далее, по мере продвижения потока по ширине и высоте топки, она уменьшается за счет того, что топливо воспламеняется и выгорает в нормальном режиме, разбавляя газовый поток продуктами сгорания. Физическая достоверность результатов подтверждается тем, что поля содержания кислорода в топке представляют собой противоположную картину температурным полям, как видно на рис. 4, б. Кроме того, значения температуры дымовых газов на выходе из топки соответствуют полученным при тепловом расчете. Также на приведенных графиках видно, что чем больше влажность топлива, тем меньше температура в зоне расположения горелок.

Выводы

Возможности прогнозирования теплофизических процессов в топках котлов большой мощности позволяют составить предварительную оценку влияния характеристик непроектного топлива на эффективность сжигания в условиях выбранного способа.

Полученные характерные для такого вида топлива и типа горелок аэродинамическая структу-

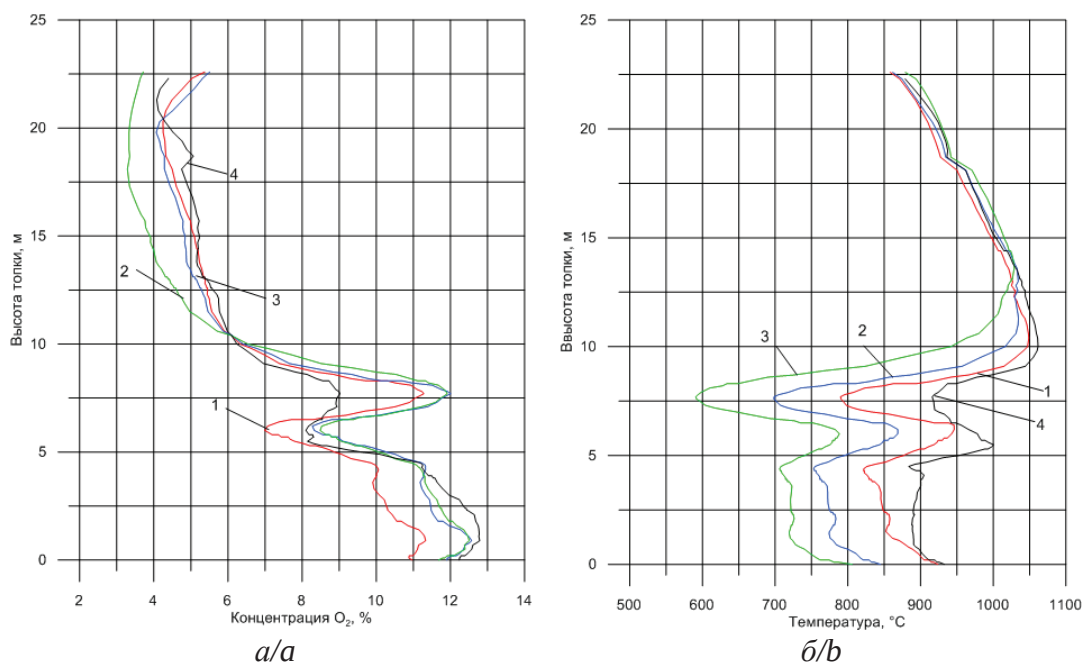


Рис. 4. Изменение концентрации кислорода (а) и температуры (б) по высоте топки при сжигании: таловского угля с влажностью 30 % (1); 40 % (2); 50 % (3) и кузнецкого угля (4)

Fig. 4. Concentration change of oxygen (a) and temperature (b) along the height of furnace while burning: Talovsky coal with humidity – 30 % (a); 40 % (b); 50 % (c) and Kuznetsk coal (d)

ра, температурный режим и концентрация твердых частиц в топочном объеме являются сопоставительной базой для дальнейших вариативных исследований существующих технологий сжигания.

Как показало исследование при данной компоновке горелок, наиболее надежное ведение топочных процессов достигается при сжигании таловского угля влажностью рабочей массы на уровне 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.Я., Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Уголь России: состояние и перспективы. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 271 с.
- Плакиркина Л.С. Развитие добычи и экспорта угля в основных странах мира и России в период 2000–2013 (2012) гг. Вызовы и угрозы развитию добычи и экспорта угля в России в перспективном периоде // Горная промышленность. – 2014. – № 2 (114). – С. 6–12.
- Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках / М.Н. Башкова, С.А. Казимиров, М.В. Темлянец, В.И. Багрянцев, А.А. Рыбушкин, К.С. Слаженва // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 2 (8). – С. 24–32.
- Лобовников А.О., Базылева Я.В. Эколого-экономическая оценка эффективности технологии очистки выбросов тепловых электростанций // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2013. – № 5 (29). – С. 149–155.
- РД 153–34.1–44.302–2001. Методические указания по организации изменения топливного режима в связи с недостатком проектных углей на электростанциях РАО «ЕЭС России». – М.: СПО ОРГРЭС, 2001. – 10 с.
- Тайлашева Т.С., Воронцова Е.С. Претензионная работа по топливу для предприятий энергетики // Теплофизические основы энергетических технологий: сборник статей V Всероссийской научной конференции с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 355–358.
- Гиль А.В., Старченко А.В., Загорин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография. – Томск: STT, 2011. – 181 с.
- Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers / X. Zhang, J. Zhou, S. Sun, R. Sun, M. Qin // Fuel. – 2015. – № 142. – P. 215–221.
- Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace / M. Yang, Y.Y. Shen, H.T. Xu, M. Zhao, S.W. Shen, K. Huang // Applied Thermal Engineering. – 2015. – № 88. – P. 237–247.
- Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Загорин А.С. Перспективность низкосортных топлив Томской области для теплотехнологического использования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 41–46.
- Казакова О.А., Загорин А.С., Казаков А.В. Исследование угля Таловского месторождения Томской области: монография. – Томск: STT, 2010. – 172 с.
- Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Министерство энергетики Российской Федерации. Проект. URL: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/621/621d81f0fb5a11919f912bfa3248d6.pdf> (дата обращения: 22.10.2015).
- Optimization of drying of low-grade coal with high moisture content using a disc dryer / S. Moon, I. Ryu, S. Lee, T. Ohm // Fuel Processing Technology. – 2014. – № 124. – P. 267–274.
- Энергосберегающий метод подготовки твердого топлива к сжиганию / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, В.М. Кошельник // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 8 (114). – С. 61–66.
- Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурого угля КАБ в вихревой топке /

- Д.В. Красинский, В.В. Саломатов, И.С. Ануфриев, О.В. Шарыпов, Е.Ю. Шадрин, Ю.А. Аникин // Теплоэнергетика. – 2015. – № 3. – С. 54–61.
16. Расчетное исследование процессов аэродинамики, тепломассообмена, горения и образования оксидов азота в двухвихревой топочной камере котла БКЗ-640 с холостым дутьем / Н.С. Чернецкая, А.В. Минаков, И.А. Брикман, М.Ю. Чернецкий // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 11–16.
17. A validation of computational fluid dynamics temperature distribution prediction in a pulverized coal boiler with acoustic temperature measurement / N. Modlinski, P. Madejski, T. Janda, K. Szczepanek, W. Kordylewski // Energy. – 2015. – № 92. – P. 77–86.
18. Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design / J. Yang, J.A. Kim, J. Hong, M. Kim, Ch. Ryu, Y.J. Kim, H.Y. Park, S.H. Baek // Fuel. – 2015. – № 144. – P. 145–156.
19. Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 655–671.
20. Application of numerical analysis for physical and chemical combustion processes in design of boiler units / A.V. Gil, A.S. Zavorin, E.S. Vorontsova, G.A. Nizkodubov // Proceedings of the International Conference «Mechanical Engineering, Automation and Control Systems» (MEACS). – Tomsk, 2014. – P. 1–4.
21. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

Поступила 22.12.2015 г.

UDC 621.18–182.2

EVALUATION OF BURNING CONDITIONS OF HIGH-HUMIDITY NON-PROJECT FUEL IN CHAMBER FURNACE BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Tatyana S. Taylasheva,

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

Andrey V. Gil,

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

Elena S. Vorontsova,

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

Relevance of this research is due to the number of issues of the fuel and energy complex, first of all to depletion of project fuel for many thermal power plants, increase of the cost of imported fuel, including operating costs, and tasks of focusing the region on the use of its own capabilities.

Goal of the research: pre-project selection of characteristics of high-humidity lignite from Talovsky deposit on the basis of which we can assess the capabilities of its efficient burning in high power boilers by using numerical simulation of processes in the boiler furnace at several variations of moisture content in original fuel, and consider the necessity of reconstruction of the system of dust preparing, and the reduction of existing layout of burners. Comparison of chemical and physical processes flowing at the combustion of project and non-project fuel helps to develop the base for researches with current technologies of combustion of solid fuel.

Research technique: numerical simulation in specific application package FIRE 3D based on Euler-Lagrangian approach, finite-difference method, «κ-ε» turbulence model, P1-approximation spherical-harmonic method and on normative method of thermal design of boilers.

The results: allocation of temperature fields in furnace volume, oxygen and solids concentration, aerodynamic structure of flow were obtained. The basis for comparative research of existing technology of solid fuel burning, especially for local low-grade coal, was established.

Findings: peak maximum efficacy of burning is at humidity of the working mass of Talovsky coal about 30 %, this fact should be considered at research of different technologies and burning products.

Key words:

Lignite, non-project fuel, boiler, numerical simulation, furnace volume, aerodynamics, comparative researches.

REFERENCES

1. Afanasev V.Ya., Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. *Ugol Rossii: sostoyanie i perspektivy* [Coal of Russia: state and prospects]. Moscow, INFRA-M Publ., 2014. 271 p.
2. Plakitkina L.S. Razvitiye dobychi i eksporta uglya v osnovnykh stranakh mira i Rossii v period 2000–2013 (2012) gg. Vyzovy i ugrozy razvitiyu dobychi i eksporta uglya v Rossii v perspektivnom periode [Coal output and export trends in main coal producing countries and Russia in 2000–2013 (2012). Challenges and risks of coal output and export development in Russia in the future period]. *Mining Industry Journal*, 2014, vol. 114, no. 2, pp. 6–12.
3. Bashkova M.N., Kazimirov S.A., Temlyantsev M.V., Bagryantsev V.I., Rybushkin A.A., Slazheva K.S. Praktika i perspektivy primeneniya razlichnykh sposobov szhiganiya tverdogo topliva v teploenergeticheskikh ustanovkakh [Practice and opportunities of using different types of burning solid fuel in heat-and-power engineering plants]. *Vestnik SibGIU*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 24–32.
4. Lobovnikov A.O., Bazyleva Ya.V. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti tekhnologii ochistki vybrosov teplovykh elektrostantsiy [Eco-economic evaluation of emission treatment technologies efficiency at thermal power stations]. *Economic and social changes: facts, trends, forecast*, 2013, vol. 29, no. 5, pp. 149–155.
5. RD 153–34.1–44.302–2001. *Metodicheskie ukazaniya po organizatsii izmeneniya toplivnogo rezhima v svyazi s nedostatkom produktivnykh ugley na elektrostantsiyakh RAO «EES Rossii»* [RD 153–34.1–44.302–2001. Instruction notes on organizing changes of fuel regime due to the lack of project coal at electrical stations RAO «UEC of Russia»]. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2001. 10 p.
6. Taylasheva T.S., Vorontsova E.S. Pretensionnaya rabota po toplivu dlya predpriyatiy energetiki [Claims activities about fuel for energetic facilities]. *Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy: sbornik statey V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. 5th Rus. Scien. Conf. Thermophysical properties of energy technologies]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. pp. 355–358.
7. Gil A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. *Primenenie chislennoy modelirovaniya topichnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo* [Use of numerical simulation of burning process for practice of transfer boilers on non-project fuel]. Tomsk, STT Publ., 2011. 181 p.
8. Zhang X., Zhou J., Sun S., Sun R., Qin M. Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers. *Fuel*, 2015, no. 142, pp. 215–221.
9. Yang M., Shen Y.Y., Xu H.T., Zhao M., Shen S.W., Huang K. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace. *Applied Thermal Engineering*, 2015, no. 88, pp. 237–247.
10. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Perspektivnost nizkosortnykh topliv Tomskoy oblasti dlya teplotekhnologicheskogo ispolzovaniya [Prospects of using low-grade fuels of Tomsk region]

- gion for thermal technology use]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 41–46.
11. Kazakova O.A., Zavorin A.S., Kazakov A.V. *Issledovanie uglya Talovskogo mestorozhdeniya Tomskoy oblasti* [Research of coal from Talovsky field in Tomsk region]. Tomsk, STT Publ., 2010. 172 p.
12. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda. Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Proekt* [Energetic strategy of Russia for a period until 2035. The Ministry of Energy of the Russian Federation. Project]. Available at: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/621/621d81f0fb5a11919f912bfafb3248d6.pdf> (accessed 22 October 2015).
13. Moon S., Ryu I., Lee S., Ohm T. Optimization of drying of low-grade coal with high moisture content using a disc dryer. *Fuel Processing Technology*, 2014, no. 124, pp. 267–274.
14. Kutovoy V.A., Kazarinov Yu.G., Lutsenko A.S., Nikolaenko A.A., Koshelnik V.M. Energoberegayushchiy metod podgotovki tverdogo topliva k szhiganiyu [Energy-saving method of preparing solid fuel for burning]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2013, vol. 114, no. 8, pp. 61–66.
15. Krasinskiy D.V., Salomatov V.V., Anufriev I.S., Sharypov O.V., Shadrin E.Yu., Anikin Yu.A. Modelirovanie topochnykh protsessov pri szhiganii raspylennogo uglya v vikhrevoi topke usovershenstvovannoy konstruksii. Chast 2. Gorenje burogo uglya KAB v vikhrevoi topke [Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. Part 2. Combustion of brown coal from the Kansk-Achinsk basin in a vortex furnace]. *Thermal Engineering*, 2015, no. 3, pp. 54–61.
16. Chernetskaya N.S., Minakov A.V., Brikman I.A., Chernetskiy M.Yu. Raschetnoe issledovanie protsessov aerodinamiki, teplo-massoobmena, goreniya i obrazovaniya oksidov azota v dvukhvikhrevoi topochnoy kamere kotla BKZ-640 s kholostym dudem [The design study of the processes of aerodynamics, heat-and-mass transfer, combustion and formation of nitrogen oxides in double-vortex furnace in the boiler BKZ2640 with blank blast]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 11–16.
17. Modlinski N., Madejski P., Janda T., Szczepanek K., Kordylewski W. A validation of computational fluid dynamics temperature distribution prediction in a pulverized coal boiler with acoustic temperature measurement. *Energy*, 2015, no. 92, pp. 77–86.
18. Yang J., Kim J. A., Hong J., Kim M., Ryu Ch., Kim Y.J., Park H.Y., Baek S.H. Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design. *Fuel*, 2015, no. 144, pp. 145–156.
19. Gil A.V., Starchenko A.V. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-khimicheskikh protsessov szhiganiya ugley v kamernykh topkakh kotelnykh agregatov na osnove paketa prikladnykh program FIRE 3D [Mathematical modelling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 655–671.
20. Gil A.V., Zavorin A.S., Vorontsova E.S., Nizkodubov G.A. Application of numerical analysis for physical and chemical combustion processes in design of boiler units. *Proceedings of the International Conference. Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2014. pp. 1–4.
21. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal design of boilers (Normative method)]. St. Petersburg, NPO TSKTI Publ., 1998. 256 p.

Received: 22 December 2015.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректурa *Д.В. Заремба*
Перевод на английский язык *В.Ю. Пановица*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати 27.01.2016. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 15,82. Уч.-изд. л. 14,31.
Заказ 72-16. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ