

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 1, 2018

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс в объединённом каталоге
«Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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

Volume 329, № 1, 2018

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

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

AIMS AND SCOPE

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|--|---|---|
| <p>Инжекция углекислого газа в газогидратный пласт
 Хасанов М.К., Столповский М.В.,
 Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К.</p> <p>Комплексная методика подбора реагентов для удаления
 асфальтеносмолапарафиновых отложений в
 механизированных нефтедобывающих скважинах
 Сюзев А.В., Лекомцев А.В., Мартыусhev Д.А.</p> <p>Применение геотермометров для оценки глубинных
 температур циркуляции термальных вод на примере
 Восточной Тувы
 Шестакова А.В., Гусева Н.В.</p> <p>Бинарные массы земной коры и биосферы
 Лабушев М.М.</p> <p>Снижение дефицита вяжущих для закладочных смесей
 Голик В.И., Белодедов А.А., Логачев А.В., Шурьгин Д.Н.</p> <p>Обоснование выбора смазочных материалов
 для буровой технологии
 Янгиров Ф.Н., Яхин А.Р., Мустафин Т.С., Дихтырь Т.Д.</p> <p>Семантическая сегментация данных дистанционного
 зондирования земли при помощи нейросетевых
 алгоритмов
 Друки А.А., Спицын В.Г., Болотова Ю.А., Башлыков А.А.</p> <p>Формирование исходных метеорологических массивов с
 использованием многолетних рядов FM 12 SYNOP и
 METAR в системных энергетических исследованиях
 Карамов Д.Н.</p> <p>Профиль концентрации инерционных частиц в
 турбулентном течении в плоском канале
 Сиковский Д.Ф.</p> <p>О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант
 механизма процессов гидратации и твердения цемента
 Лотов В.А.</p> <p>Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и
 минеральный состав воды и донных отложений
 Колпакова М.Н., Гаскова О.Л.,
 Наймушина О.С., Кривоногов С.К.</p> <p>Тепловые режимы и тепловые потери подземных
 трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена
 на внешнем контуре взаимодействия
 Половников В.Ю.</p> <p>Оценка и обеспечение безопасности эксплуатации
 нефтегазопроводов в условиях нестационарности
 технологических параметров
 Павлова З.Х., Азметов Х.А.,
 Абдрахманов Н.Х., Павлова А.Д.</p> <p>Анализ влияния электрических повреждений в обмотке
 возбуждения на виброактивность синхронного
 турбодвигателя
 Полищук В.И., Герасимов Н.В., Крицкий М.В., Глазырин А.С.</p> <p>Открытая трещиноватость баженовской свиты и
 перспективы её разработки
 Белозёров В.Б.</p> | <p>6</p> <p>15</p> <p>25</p> <p>37</p> <p>44</p> <p>51</p> <p>59</p> <p>69</p> <p>89</p> <p>99</p> <p>111</p> <p>124</p> <p>132</p> <p>140</p> <p>150</p> | <p>Injection of carbon dioxide in gas hydrate porous reservoir
 Khasanov M.K., Stolpovsky M.V.,
 Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K.</p> <p>Complex method of selecting reagents
 to delete asphaltenosmolaparinine deposits
 in mechanized oil-producing wells
 Syuzev A.V., Lekomtsev A.V., Martynyushev D.A.</p> <p>Calculation of deep temperatures
 of thermal waters
 in Eastern Tuva
 Shestakova A.V., Guseva N.V.</p> <p>Binary masses of the earth crust and biosphere
 Labushev M.M.</p> <p>Reduction of deficit in binders for backfilling mixtures
 Golik V.I., Belodedov A.A., Logachev A.V., Shurygin D.N.</p> <p>Substantiation of lubricant selection
 for drilling technology
 Yangirov F.N., Yakhin A.R., Mustafin T.S., Dikhtyar T.D.</p> <p>Semantic segmentation
 of the Earth scanning images using neural
 network algorithms
 Druki A.A., Spitsyn V.V., Bolotova Yu.A., Bashlykov A.A.</p> <p>Formation of initial meteorological arrays
 using long-term series FM 12 SYNOP
 and METAR in system energy studies
 Karamov D.N.</p> <p>Profile of inertial particles concentration
 in turbulent channel flow
 Sikovsky D.Ph.</p> <p>Interaction of cement particles with water or mechanism
 of hydration and hardening of cement
 Lotov V.A.</p> <p>Ebeity Lake, Russia: chemical-organic and mineral
 composition of water and bottom sediments
 Kolpakova M.N., Gaskova O.L.,
 Naymushina O.S., Krivonogov S.K.</p> <p>Thermal regimes and thermal losses
 of underground pipelines in real heat exchange
 on the outer interaction boundary
 Polovnikov V.Yu.</p> <p>Assessment and safety of operation
 of oil and gas pipelines in non-steady conditions
 of technological parameters
 Pavlova Z.Kh., Azmetov Kh.A.,
 Abdrakhmanov N.Kh., Pavlova A.D.</p> <p>Analysis of the influence
 of electrical damage in field magnetizing coil
 on synchronous round-rotor motor vibration
 Polishchuk V.I., Gerasimov N.V., Kritsky M.V., Glazyrin A.S.</p> <p>Open-fractured bazhenov suite
 and its future development
 Belozarov V.B.</p> |
|--|---|---|

УДК 622.279.72

ИНЖЕКЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ГАЗОГИДРАТНЫЙ ПЛАСТ

Хасанов Марат Камилович¹,
hasanovmk@mail.ru

Стопповский Максим Владимирович¹,
s_maxim.pmm@mail.ru

Кильдибаева Светлана Рустамовна¹,
freya.13@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадинович²,
iljas_g@mail.ru

¹ Башкирский государственный университет,
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования связана с новым подходом к добыче природного газа из газогидратного пласта, который имеет ряд преимуществ перед предшествующими методами. Предложенные ранее методы предполагали закачку тёплой воды или понижение давления, что вело к высоким энергозатратам, выделению попутных продуктов (вода и песок), а также к разрушению дна. Предложенный метод замещения диоксидом углерода метана не только не имеет описанных выше недостатков, но и может рассматриваться как способ консервации диоксида углерода.

Цель: исследовать особенности замещения метана на диоксид углерода в газогидратном пласте при инъекции углекислого газа; провести численный эксперимент, в ходе которого установить влияние основных параметров системы на давление и температуру пласта.

Объекты: газогидратный пласт конечной протяженности, давление и температура которого в начальный момент времени соответствуют условиям стабильного существования газогидрата.

Методы. Построена математическая модель замещения метана на углекислый газ в газогидрате, учитывающая конечную протяженность пласта. Для описания процессов тепломассопереноса в пористой среде использована система уравнений, включающая законы сохранения масс, энергии, закон Дарси, уравнение состояния.

Результаты. Построена математическая модель нагнетания диоксида углерода в пласт, насыщенный метаном и его гидратом. Проведенный численный эксперимент показал, что в определенном диапазоне значений параметров, характеризующих нагнетаемый газ и начальное состояние пласта, полученная температура пласта в области, насыщенной газогидратом метана, ниже равновесной температуры разложения газогидрата метана, которая соответствует вычисленному распределению давления. При понижении давления нагнетаемого диоксида углерода или увеличении давления пласта значение температуры пласта поднимается выше значения равновесной температуры диссоциации метаногидрата. Это ведет к возникновению промежуточной области, насыщенной метаном и водой.

Ключевые слова:

Гидрат метана, диоксид углерода, гидратообразование, пористый пласт, замещение.

Введение

Газовые гидраты – один из перспективных источников энергии будущего. Ввиду широкой географии распространения и практически нетронутых запасов газовые гидраты представляют большой интерес как для учёных, так и для нефтедобывающих компаний по всему миру [1]. Первым разрабатываемым газогидратным месторождением стала Мессояхская залежь. Добыча природного газа из гидрата возможна при его диссоциации. В начале XXI в. были проведены совместные исследования по добыче гидрата таких стран, как Канада, США, Германия, Япония, Индия, для разработки месторождения Малик на территории вечной мерзлоты в Канаде. Первоначально добыча гидрата осуществлялась путём закачки тёплой воды в скважину, затем применялся метод понижения давления, однако оба метода являются очень энерго-

затратными [2]. Более того, при таких способах добычи природного газа из гидрата выделялись сопутствующие продукты (вода и песок) [3].

В материковой части зон вечной мерзлоты находится лишь малая часть всего объёма запасов газовых гидратов, а большая часть сосредоточена на дне Мирового океана [2, 4]. Первые исследования по получению газовых гидратов из недр Мирового океана были проведены в 2013 г. Японией в Нанкайском прогибе [5, 6]. Применение способа диссоциации гидрата для залежей на море представляется нецелесообразным вследствие выделения больших объемов воды и опасности разрушения дна [7].

Во избежание нарушения прочности пород был предложен метод замещения газогидрата метана диоксидом углерода [8–12]. В этом случае вода не выделяется, так как гидрат метана заменяется ги-

дратом углекислого газа. Вследствие того, что вязкость диоксида углерода в жидком виде на несколько порядков ниже, чем воды, он легко распространяется в пористой среде [13].

Также установлено, что метод замещения не влияет на механическую прочность пород [13]. Первые опыты по замещению метана в газогидрате на диоксид углерода были проведены в 2011 г. на северном склоне Аляски [14]. На сегодняшний момент проведен ряд лабораторных экспериментов, в которых изучалась кинетика гидратообразования, зависимость гидратообразования от проницаемости, минерализации воды и способа инъекции диоксида углерода.

Математические модели инъекции углекислого газа в пласт, содержащий метан и его газогидрат, представлены в работах [15, 16]. Однако в этих работах построены решения задачи в автомодельном приближении для полубесконечного пласта. В настоящей работе, в отличие от [15, 16], учитывается конечная протяженность пласта и исследуется влияние давления на его внешней границе на особенности протекания процесса замещения.

Постановка задачи

Рассмотрим пористый пласт конечной протяженности, который в начальный момент времени заполнен метаном и гидратом метана с насыщенностью v . Кровля и подошва пласта непроницаемы, давление p_0 и температура T_0 пласта соответствуют условиям стабильного существования смеси метана и его гидрата:

$$t = 0, x > 0: T = T_0, p = p_0, S_h = v.$$

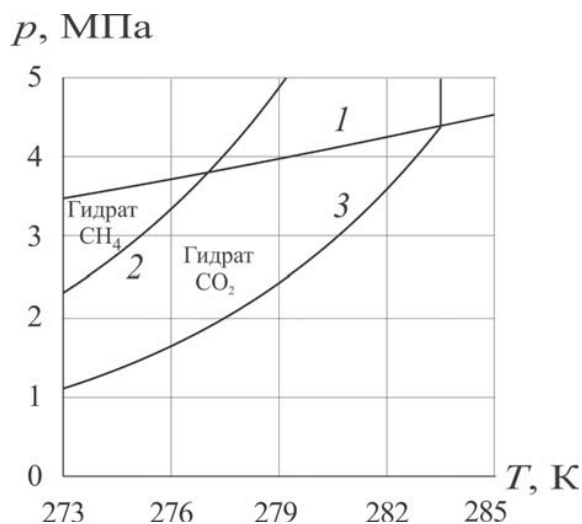


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия гидратов метана и диоксида углерода

Fig. 1. Diagram of phase equilibrium of methane hydrates and carbon dioxide

Через левую границу пласта ($x=0$) закачивается диоксид углерода в газообразном состоянии. Давление p_w и температура T_w диоксида углерода поддерживается постоянной и соответствует условиям

существования гетерогенной смеси углекислого газа и его гидрата:

$$t > 0, x = 0: T = T_w, p = p_w.$$

На диаграмме фазового равновесия (рис. 1) представлены кривые, относящиеся к метану и диоксиду углерода: 1) «жидкость–пар» для диоксида углерода; 2) «газ–вода–гидрат» для метана; 3) «газ–вода–гидрат» для диоксида углерода. Для рассматриваемой задачи значения давления и температуры пласта на диаграмме соответствуют области, выше кривой 2, а закачиваемого диоксида углерода – между кривыми 1 и 3.

Значения давления и температуры равновесной кривой «газ–вода–гидрат» описываются уравнением [17]:

$$p = p_{s0} \exp\left(\frac{T - T_0}{T_*}\right), \quad (1)$$

где p_{s0} – равновесное значение давления, которое соответствует температуре T_0 ; T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Течение в пористых пластах считаем ламинарным. Вследствие того, что процесс нагнетания газа протекает быстрее, чем процесс диффузии, и массоперенос, вызванный процессом фильтрации, многократно превосходит массоперенос, вызванный диффузией. Применительно к данной задаче вязкость диоксида углерода приблизительно в полтора раза превышает вязкость метана для диапазона рассматриваемых давлений и температур. Согласно этим замечаниям, можно пренебречь перемешиванием газов и считать устойчивым фронт вытеснения метана углекислым газом. Вследствие вышеперечисленных факторов можно предположить, что при закачке диоксида углерода образуются две области. В ближней области поры пласта насыщены диоксидом углерода и его гидратом, а в дальней области поры пласта насыщены метаном и его гидратом (рис. 2). С учетом всех допущений замещение CH_4 на углекислый газ в составе метаногидрата полностью реализуется на подвижной границе, разделяющей эти зоны.

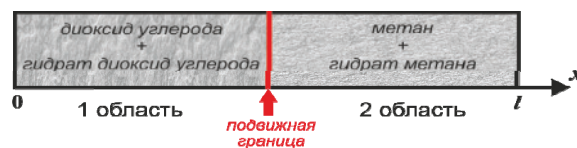


Рис. 2. Схема областей, формируемых при закачке диоксида углерода

Fig. 2. Areas formed by injection of carbon dioxide

В представленной модели не учитываются неравновесные процессы, связанные с диффузией газа через гидратную оболочку, поскольку, согласно оценкам, представленным в работах [15, 16] для значений проницаемости, характерных для реальных природных пластов, этими процессами можно пренебречь. В работе [18] было показано, что при вытеснении смешивающихся жидкостей в природ-

ных пористых пластах фильтрационный (конвективный) перенос значительно преобладает над диффузионным. В этой связи диффузионным перемешиванием газов в данной задаче будем пренебрегать.

При описании процесса инъекции диоксида углерода в пористый пласт примем ряд допущений:

- температуры пористого пласта и насыщающего вещества совпадают;
- гидраты диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4) являются двухкомпонентными системами с соответствующими массовыми концентрациями G_c и G_m ;
- пористость постоянна;
- скелет пористой среды и газогидрат несжимаемы;
- метан и диоксида углерода являются калорически совершенными газами.

Основные уравнения

С учетом вышеперечисленных допущений система уравнений для описания процессов массо- и теплопереноса в газогидратном пласте, в прямолинейно-параллельном случае имеет вид [19–25]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi S_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i \phi S_i v_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho C T) + \rho_i c_i \phi S_i v_i \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\ \phi S_i v_i &= -\frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho_i = p / R_{gi} T. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее нижние индексы $i=c, m$ соответствуют параметрам диоксида углерода и метана; p – давление; T – температура; ϕ – пористость; ρ_i – истинная плотность, v_i – скорость, k_i – проницаемость, c_i – удельная массовая теплоемкость, R_{gi} – газовая постоянная, μ_i – динамическая вязкость i -й фазы; S_i – насыщенность пор пласта i -й фазой; λ – коэффициент теплопроводности газогидратного пласта; ρC – коэффициент удельной объемной теплоемкости газогидратного пласта.

Вследствие того, что в данной задаче рассматривается калорически совершенный газ и относительно небольшой диапазон изменения давления, во втором уравнении системы (2) отброшены слагаемые, отвечающие за эффекты Джоуля–Томсона и адиабатического расширения.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости k_i для i -й газовой фазы от газонасыщенности S_i и абсолютной проницаемости k_0 зададим в виде:

$$k_i = k_0 S_i^3 \quad (i = c, m).$$

Так как в данной постановке задачи пренебрегаем перемешиванием газов и считаем устойчивым фронт вытеснения метана углекислым газом, с учётом замещения условия баланса массы углекислого газа и метана на границе между областями примут вид:

$$\begin{aligned} \phi S_c \rho_c \left(v_c - \dot{x}_{(n)} \right) &= \phi S_{hc} \rho_{hc} G_c \dot{x}_{(n)}, \\ \phi S_m \rho_m \left(v_m - \dot{x}_{(n)} \right) &= \phi S_{hm} \rho_{hm} G_m \dot{x}_{(n)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ_{hi} – плотность гидрата и S_{hi} – насыщенность гидрата i -й фазы; $\dot{x}_{(n)}$ – скорость движения границы фазовых переходов. Здесь и далее нижний индекс n относится к параметрам на границе между областями.

Условия баланса массы и тепла на границе между областями с учётом (3) и законом Дарси можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} -\frac{k_c}{\mu_c} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} &= \phi \left(\frac{\rho_{hc}}{\rho_c} S_{hc} G_c + S_c \right) \dot{x}_{(n)}, \\ -\frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} &= \phi \left(\frac{\rho_{hm}}{\rho_m} S_{hm} G_m + S_m \right) \dot{x}_{(n)}, \\ \phi S_{hc} \rho_{hc} (1 - G_c) \dot{x}_{(n)} &= \phi S_{hm} \rho_{hm} (1 - G_m) \dot{x}_{(n)}, \\ \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} &= \phi (S_{hc} \rho_{hc} L_{hc} - S_{hm} \rho_{hm} L_{hm}) \dot{x}_{(n)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь L_{hi} – теплота образования гидрата i -й фазы ($i=c, m$); $p_{(j)}$ и $T_{(j)}$ – давление и температура в j -й области; нижние индексы $j=1, 2$ относятся к параметрам первой и второй областей.

Температура и давление на границе между областями полагаются непрерывными:

$$p_{n(1)} = p_{n(2)} = p_{(n)}, \quad T_{n(1)} = T_{n(2)} = T_{(n)}.$$

Насыщенность пористой среды газогидратом CH_4 во 2-й зоне $S_{hm} = v$. Тогда величина гидратонасыщенности в первой зоне может быть найдена из третьего уравнения системы (5), которое является условием баланса массы воды, связанной в газогидрате:

$$S_{hc} = \frac{\rho_{hm} (1 - G_m) v}{\rho_{hc} (1 - G_c)}.$$

На основе системы (2), уравнения пьезо- и температуропроводности можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(j)}^2}{\partial t} &= \chi_{(j)}^{(p)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p_{(j)}^2}{\partial x} \right) \quad (j = 1, 2), \\ \frac{\partial T_{(j)}}{\partial t} &= \chi^{(T)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \right) + \\ &+ \chi^{(T)} \text{Pe}_{(j)} \frac{\partial p_{(j)}^2}{\partial x} \frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \quad (j = 1, 2), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \chi_{(1)}^{(p)} &= \frac{k_c p_{(1)}}{\mu_c \phi (1 - S_{hc})}, \quad \chi_{(2)}^{(p)} = \frac{k_m p_{(2)}}{\mu_m \phi (1 - v)}, \\ \text{Pe}_{(1)} &= \frac{\rho_{0c} C_c k_c}{2 \lambda \mu_c p_{(1)}}, \quad \text{Pe}_{(2)} = \frac{\rho_{0m} C_m k_m}{2 \lambda \mu_m p_{(2)}}, \quad \chi^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho C}. \end{aligned}$$

Результаты расчетов

Для решения поставленной задачи (5) с условиями (3), (4) на подвижной границе фазового перехода строится равномерная сетка с шагом h . Поскольку решение задачи ищется в зонах с одной неизвестной подвижной границей (поверхностью фазовых переходов), то для ее решения используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки. В соответствии с этим методом неизвестный шаг по времени τ_{j+1} выбирается таким образом, чтобы фронт фазовых превращений перемещался по пространственной координате x ровно на один шаг: $x_{(n)}(t_{j+1}) - x_{(n)}(t_j) = h$. Уравнениям (5), описывающим распределения температуры и давления, а также условиям (3), (4) на подвижной границе фазовых превращений ставятся в соответствие неявные дискретные аналоги. Полученная при этом система алгебраических уравнений решается на каждом временном слое методом простых итераций в сочетании с алгоритмом прогонки.

С течением времени межфазная граница будет перемещаться от левой границы пласта к правой, а температура пористой среды будет возрастать (поскольку в работе рассматривается случай закачки газа с температурой выше, чем исходная температура пласта). При этом, поскольку газогидрат считается неподвижным, насыщенности пор фазами (газом и газогидратом) явно не зависят от времени.

Поскольку при построении математической модели полагалось, что в первой области существует гидрат диоксида углерода, а во второй области –

гидрат метана, предложенная модель адекватно описывает процесс, если давление в первой и во второй областях выше равновесного давления образования газогидратов соответственно углекислого газа и метана. Значение такого равновесного давления определяется формулой (1) согласно найденному в процессе решения распределению температуры (будем называть это условием термодинамической непротиворечивости). Начальные значения давления и температуры пласта соответствуют на фазовой диаграмме зоне стабильного существования гидрата метана (выше кривой 2). Тогда, если инжестировать углекислый газ с давлением и температурой, которые также расположены в указанной зоне, условие термодинамической непротиворечивости заведомо выполняется.

Если выполняется условие, что давление и температура закачиваемого диоксида углерода лежат в зоне существования метана и воды (ниже кривой 2), то возможна ситуация, когда значения давления и температуры на некотором участке второй области соответствуют условиям разложения гидрата метана на газ и воду.

На рис. 3 приведены зависимости температуры и давления от координаты в момент времени $t=200$ сут. для двух разных значений давления закачиваемого газа $p_e=3,4$ (а) и $3,1$ МПа (б). Расчеты производились при следующих начальных и граничных условиях: $L=100$ м, $v=0,4$, $m=0,2$, $T_w=276$ К, $T_0=274$ К, $T_e=276$ К, $p_0=3$ МПа, $G_c=0,28$, $G_m=0,13$, $\phi=0,1$, $k_0=5 \cdot 10^{-15}$ м², $T_* = 10$ К, $p_{s0}=2,87$ МПа,

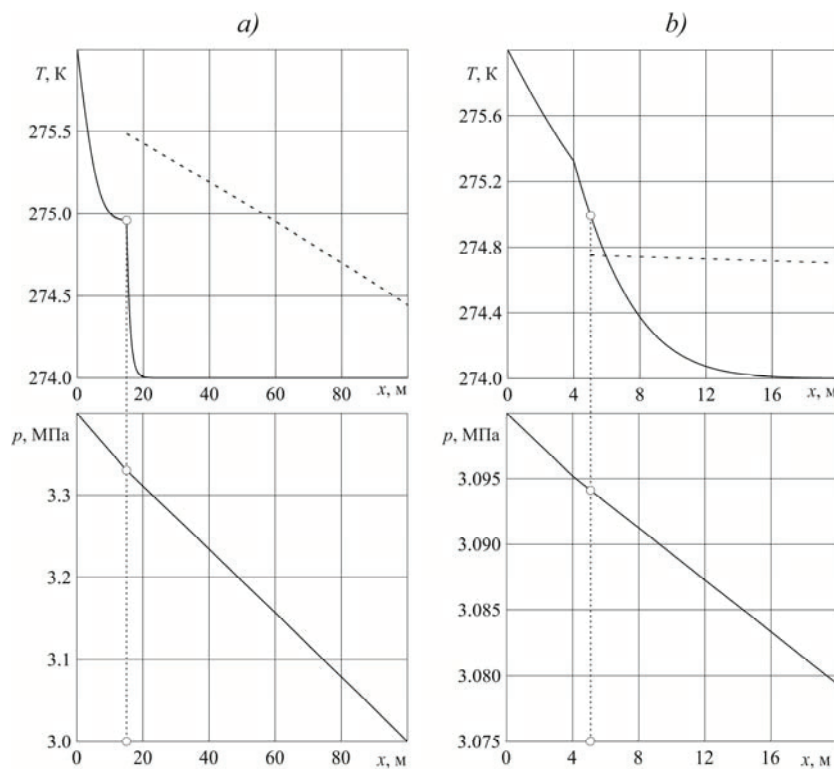


Рис. 3. Распределение температуры и давления пласта в момент времени $t=200$ сут. при p_e : а) 3,4; б) 3,1 МПа

Fig. 3. Distribution of temperature and pressure of the reservoir at $t=200$ days and p_e : а) 3,4; б) 3,1 МПа

$\lambda=2$ Вт/(м·К), $\rho_c=2,5 \cdot 10^6$ Вт/(м·К), $\rho_{hc}=1100$ кг/м³, $\rho_{hm}=900$ кг/м³, $C_c=800$ Дж/(кг·К), $C_m=1560$ Дж/(кг·К), $R_{gc}=189$ Дж/(кг·К), $R_{gm}=520$ Дж/(кг·К), $L_{hm}=4,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L_{hc}=4,1 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\mu_c=1,4 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_m=10^{-5}$ Па·с, $T_{cs}=7,6$ К, $T_{ms}=10$ К, $p_{sc}=1,29$ МПа, $p_{sm}=2,87$ МПа [16,18].

Согласно рис. 3, при высоком значении давления нагнетания диоксида углерода (случай *a*) температура пласта (сплошная линия) в области, насыщенной газогидратом метана, не поднимается выше равновесной температуры разложения газогидрата метана, соответствующей вычисленному распределению давления (штриховая линия). Таким образом, в данном случае решение с фронтальной поверхностью фазовых переходов дает термодинамически непротиворечивое описание процесса замещения метана на углекислый газ в газогидрате. При меньшем значении давления инжектируемого диоксида углерода (случай *b*) значение температуры пористой среды на некотором участке области, насыщенной газогидратом метана, поднимается выше равновесной температуры диссоциации метана гидрата. Это вызывает перегрев гидрата метана. Следовательно, в данном случае необходимо вводить вторую поверхность фазовых превращений, на которой происходит диссоциация гидрата CH_4 на метан и воду.

Отметим, что с течением времени межфазная граница будет перемещаться.

На рис. 4 приведены зависимости температуры и давления от координаты в момент времени $t=200$ сут. для двух разных значений давления на правой границе пласта $p_0=3,0$ (а) и $p_0=3,2$ МПа (б).

Согласно рис. 4, при более низком значении давления p_0 (случай *a*) температура пласта (сплошная линия) в области, насыщенной газогидратом метана, ниже равновесной температуры разложения газогидрата метана, соответствующей вычисленному распределению давления (штриховая линия). Поэтому данное решение соответствует условию термодинамической непротиворечивости. При более высоком значении давления p_0 (случай *b*) температура пласта на некотором участке области, насыщенной газогидратом метана, превышает значение температуры разложения метаногидрата. В связи с этим наблюдается перегрев смеси метана и его гидрата, и возникает необходимость введения второй границы фазовых переходов. В этой области происходит диссоциация метаногидрата на метан и воду.

На рис. 5 приведена зависимость температуры на границе фазового перехода от давления нагнетаемого газа в момент времени $t=200$ сут. для двух разных значений проницаемости $k_0=10^{-14}$ м² (линия 1) и $k_0=5 \cdot 10^{-15}$ м² (линия 2). Это обусловлено тем, что в этом случае уменьшается скорость движения фронта замещения и его координаты и соответственно увеличивается влияние более горячей левой границы ($T_c > T_0$) на температуру данного фронта. В этой связи при низких значениях давления инъекции температура пласта на фронте замещения поднимается выше равновесной температуры диссоциации метаногидрата, что соответствует возникновению промежуточной области, насыщенной метаном и водой, т. е. режиму со второй поверхностью фазовых превращений, на которой происходит диссоциация метаногидрата.

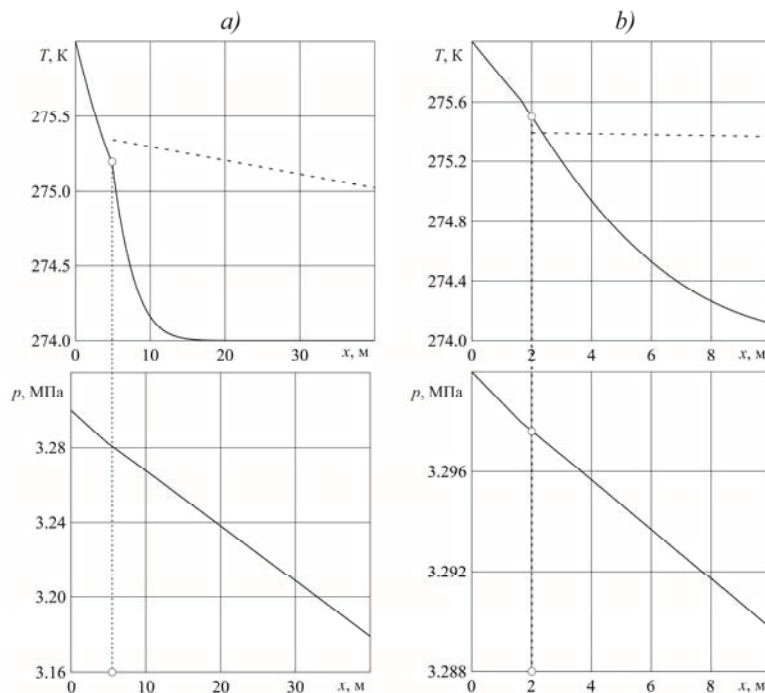


Рис. 4. Распределение температуры и давления пласта в момент времени $t=200$ сут. при p_0 : а) 3,0; б) 3,2 МПа; $k_0=2 \cdot 10^{-15}$ м²

Fig. 4. Distribution of temperature and pressure of the reservoir at $t=200$ days, p_0 : а) 3,0; б) 3,2 МПа; $k_0=2 \cdot 10^{-15}$ м²

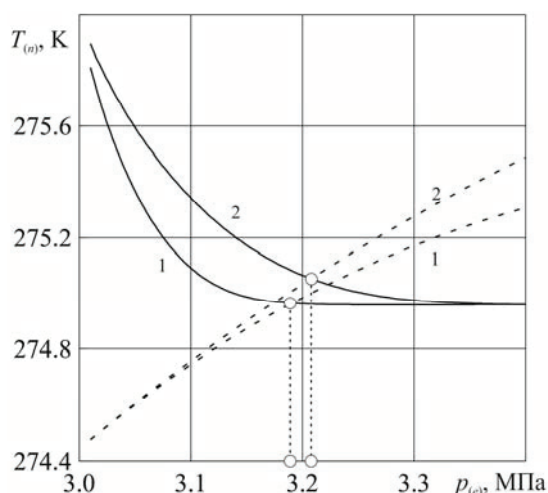


Рис. 5. Зависимость температуры на границе фазового перехода от давления нагнетаемого газа в момент времени $t=200$ сут. при $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$ (линия 1) и $k_0=5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (линия 2)

Fig. 5. Dependence of temperature on the boundary of phase transition on injected gas pressure at $t=200$ days, $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$ (line 1) and $k_0=5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (line 2)

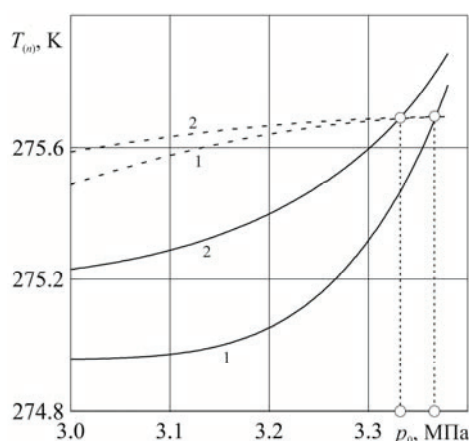


Рис. 6. Зависимость температуры на границе фазового перехода от исходного давления системы в момент времени $t=200$ сут. при $v=0,4$ (линия 1) и $v=0,5$ (линия 2), $p_e=3,4 \text{ МПа}$

Fig. 6. Dependence of temperature on the boundary of phase transition on the system initial pressure at $t=200$ days, $v=0,4$ (line 1) and $v=0,5$ (line 2), $p_e=3,4 \text{ МПа}$

На рис. 6 приведена зависимость температуры на границе фазового перехода от давления нагнетаемого газа в момент времени $t=200$ сут. для двух разных значений насыщенности $v=0,4$ (линия 1) и $v=0,5$ (линия 2). Согласно рис. 6, при увеличении

давления на правой границе пласта наблюдается увеличение температуры на фронте замещения. Это обусловлено тем, что в этом случае уменьшается перепад давления в пласте и соответственно уменьшается скорость движения фронта замещения и его координаты. Это приводит к тому, что увеличивается влияние более горячей левой границы ($T_e > T_0$) на температуру данного фронта. В этой связи при высоких значениях давления на правой границе пласта значение температуры пласта на фронте замещения выше значения равновесной температуры разложения газогидрата метана. Этот физический эффект соответствует возникновению промежуточной области, насыщенной метаном и водой.

Заключение

Построена математическая модель процесса нагнетания теплого диоксида углерода в природный пласт, который в начальный момент времени насыщен метаном и его гидратом. В ходе проведенного численного эксперимента установлено, что при определенных значениях параметров, характеризующих нагнетаемый газ и начальное состояние пласта, полученная температура пласта в области, насыщенной газогидратом метана, ниже равновесной температуры разложения газогидрата метана, которая соответствует вычисленному распределению давления.

При понижении давления нагнетаемого диоксида углерода или увеличении давления на правой границе пласта температура пласта в области, насыщенной газогидратом, поднимается выше равновесной температуры разложения гидрата метана. Таким образом, в данном случае существует необходимость введения второй границы фазовых переходов, на которой происходит диссоциация газогидрата метана, и, соответственно, необходимо рассматривать промежуточную область, насыщенную метаном и водой. Это обусловлено тем, что в этом случае уменьшается скорость движения фронта замещения и ее координаты, увеличивается влияние более горячей левой границы ($T_e > T_0$) на температуру данного фронта. В этой связи при низких значениях давления инъекции и высоких значениях давления на правой границе температура пласта на фронте замещения поднимается выше равновесной температуры разложения газогидрата метана.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические принципы и модели разложения гидратов природного газа / Ю.Ф. Макогон, Ф.Л. Саяхов, И.Л. Хабибуллин, Г.А. Халиков. – М.: ВНИИЭгазпром, 1988. – 32 с.
2. De Souza E.F. Understanding CO₂-EOR and its Application in Brazil // Capture Journal. 2010. URL: <http://www.carboncapturejournal.com/news/understanding-co2-eor-and-its-application-in-brazil/2832.aspx?Category=all> (дата обращения 01.07.2017).
3. Макогон Ю.Ф., Омелченко Р.Ю. Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2012. – № 3. – С. 5–19.
4. Probabilistic estimation of hydrate formation / D. Herath, F. Khan, S. Rathnayaka, M.A. Rahman // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 135. – P. 32–38.
5. Belahmidi C. Japan's Methane Hydrates Natural Gas Extraction – a Game Changer? // HIS Unconventional Blog. 2013. URL: <http://blog.ihs.com/japans-methane-hydrates-natural-gas-extraction> (дата обращения 12.07.2017).
6. Gas Production from Methane Hydrate Layers Confirmed // JOGMEC's Activities. News Release. 2013. URL: <http://www.jogmec.go.jp/english/news/release/release0110.html> (дата обращения 23.05.2017).
7. Ruppel C. Methane Hydrates and the Future of Natural Gas // MITEL Natural Gas Report. 2011. URL: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/06/MITEL-The-Future-of-Natural-Gas-Supplementary-Paper-2.4-Methane-Hydrates-and-the-Future-of-Natural-Gas.pdf> (дата обращения 6.04.2017).
8. Nago A., Nieto A. Natural Gas Production from Methane Hydrate Deposits Using CO₂ Clathrate Sequestration: State-of-Art Review and New Technical Approaches // Journal of Geological Research. 2011. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jgr/2011/239397/> (дата обращения 09.05.2017).
9. Parshall J. Production Method for Methane Hydrate Sees Scientific Success // Journal of Petroleum Technology. – 2012. – V. 64. – № 8. – P. 50–51.
10. Conoco Phillips Gas Hydrate Production Test Final Technical Report / D. Schoderbek, H. Farrell, K. Hester et al. // National Energy Technology Laboratory. – 2013. URL: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2013reports/nt0006553-finalreport.pdf> (дата обращения 11.07.2017).
11. Doe/Netl Methane Hydrate Projects. Gas Hydrate Production Trial Using CO₂/CH₄ Exchange // National Energy Technology Laboratory. – 2013. URL: <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrates/mh-06553hydrateprodtrial> (дата обращения 22.07.2017).
12. US and Japan successfully complete Arctic field of gas hydrate production technology using CO₂ – methane exchange within structure. Green Gas Congress press-release, 2012. Available at: <http://www.greencarcongress.com/2012/05/co2ch4-20120502.html> (дата обращения 21.07.2017).
13. Controllable methane hydrate formation through trace carbon dioxide charging / Y. Song, F. Wang, G. Liu, S. Luo, R. Guo // Fuel. – 2017. – V. 203. – P. 145–151.
14. Аксеров С.М. Разработка залежей метаногидратов методом замещения метана углекислым газом (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. – 2014. – № 8 (242). – С. 70–102.
15. Хасанов М.К., Шагапов В.Ш. Разложение газогидрата метана в пористой среде при инъекции теплого углекислого газа // Инженерно-физический журнал. – 2016. – № 5. – С. 1129–1140.
16. Theoretical research of the gas hydrate deposits development using the injection of carbon dioxide / V.Sh. Shagapov, M.K. Khasanov, N.G. Musakaev, Ngoc Hai Duong // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 107. – P. 347–357.
17. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
18. Collins R.E. Flow of Fluids through Porous Materials. – New York: Reinhold Publishing Corp, 1961. – 270 p.
19. Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г., Гималтдинов И.К. Особенности разложения газогидратов с образованием льда в пористой среде // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1022–1031.
20. Khasanov M.K. Investigation of regimes of gas hydrate formation in a porous medium, partially saturated with ice // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – V. 22. – № 2. – P. 245–255.
21. Гималтдинов И.К., Хасанов М.К. Математическая модель образования газогидрата при инъекции газа в пласт, частично насыщенный льдом // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80. – Вып. 1. – С. 80–90.
22. Tsypkin G.G. Formation of carbon dioxide hydrate at the injection of carbon dioxide into a depleted hydrocarbon field // Fluid Dynamics. – 2014. – V. 49. – № 6. – P. 789–795.
23. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
24. Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media. – New York: Hemisphere Publ. Corp., 1991. – 507 p.
25. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. Theory of fluid flows through natural rocks. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 395 p.

Поступила 11.09.2017 г.

Информация об авторах

Хасанов М.К., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

Столповский М.В., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

Кильдибаева С.Р., кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

Гималтдинов И.К., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.279.72

INJECTION OF CARBON DIOXIDE IN GAS HYDRATE POROUS RESERVOIR

Marat K. Khasanov¹,

hasanovmk@mail.ru

Maxim V. Stolpovsky¹,

s_maxim.pmm@mail.ru

Svetlana R. Kildibaeva¹,

freya.13@mail.ru

Ilyas K. Gimaltdinov²,

iljas_g@mail.ru

¹ Bashkir State University, Sterlitamak Branch,
49, Lenin Avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
1, Cosmonauts street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the research is associated with a new approach to natural gas extraction from the gas hydrate reservoir, which has a number of advantages over the previous methods. In the previously described methods, warm water was injected or pressure was lowered. This leads to high energy costs, the release of associated products (water and sand) and destruction bottom of the sea. The methane carbon dioxide substitution method considered in this paper does not have these drawbacks and can be considered as a method for conservation of carbon dioxide.

The main aim is to study the features of methane replacement by carbon dioxide in gas hydrate formation during carbon dioxide injection in a porous reservoir; to carry out a numerical experiment for determining the influence of the system main parameters on pressure and temperature of the reservoir.

Objects: gas hydrate reservoir of finite length, pressure and temperature of which at the initial moment of time correspond to the conditions for the stable existence of the gas hydrate.

Methods. The authors have constructed a mathematical model for methane replacement by carbon dioxide in gas hydrate, taking into account the finite extent of the formation. To describe the processes of heat and mass transfer in a porous medium, a system of equations is used, including the laws of conservation of masses, energy, Darcy's law, the equation of state.

Research results. The authors have constructed the mathematical model for injecting carbon dioxide into the reservoir saturated with methane and its hydrate. The numerical experiment showed that in a certain range of parameters characterizing the injected gas and the initial state of the formation, the obtained reservoir temperature in the region saturated with methane gas hydrate is below the equilibrium decomposition temperature of methane gas hydrate, which corresponds to the calculated pressure distribution. When the pressure of the injected carbon dioxide decreases or the formation pressure increases, the formation temperature rises above the equilibrium decomposition temperature of the methane hydrate. Therefore, it is necessary to introduce a second boundary of phase transitions and, accordingly, an intermediate region saturated with methane and water.

Key words:

Methane hydrate, carbon dioxide, hydrate formation, porous reservoir, substitution.

The research was financially supported by the grant of the Russian Science Foundation (project no. 17–79–20001).

REFERENCES

1. Makogon Yu.F., Sakhov F.L., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. *Fizicheskie printsipy i modeli razlozheniya gidratov prirodnogo gaza* [Physical principles and models of decomposition of hydrates of natural gas]. Moscow, VNIIEgazprom Publ., 1988. 32 p.
2. De Souza E.F. Understanding CO₂-EOR and its Application in Brazil. *Capture Journal*, 2010. Available at: <http://www.carbon-capturejournal.com/news/understanding-co2-eor-and-its-application-in-brazil/2832.aspx?Category=all> (accessed 1 July 2017).
3. Makogon Yu.F., Omelchenko R.Yu. Messoyakha – gas-hydrate reservoir, the role and importance of. *Geology and minerals of world ocean*, 2012, no. 3, pp. 5–19. In Rus.
4. Herath D., Khan F., Rathnayaka S., Rahman M.A. Probabilistic estimation of hydrate formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 135, pp. 32–38.
5. Belahmidi C. Japan's Methane Hydrates Natural Gas Extraction – a Game Changer? *HIS Unconventional Blog*, 2013. Available at: <http://blog.ihs.com/japans-methane-hydrates-natural-gas-extraction> (accessed 12 July 2017).
6. Gas Production from Methane Hydrate Layers Confirmed. *JOG-MEC's Activities. News Release*, 2013. Available at: <http://www.jogmec.go.jp/english/news/release/release0110.html> (accessed 23 May 2017).
7. Ruppel C. Methane Hydrates and the Future of Natural Gas. *MITEI Natural Gas Report*, 2011. Available at: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/06/MITEI-The-Future-of-Natural-Gas-Supplementary-Paper-2.4-Methane-Hydrates-and-the-Future-of-Natural-Gas.pdf> (accessed 6 April 2017).
8. Nago A., Nieto A. Natural Gas Production from Methane Hydrate Deposits Using CO₂ Clathrate Sequestration: State-of-Art Review and New Technical Approaches. *Journal of Geological Research*, 2011. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/jgr/2011/239397/> (accessed 9 May 2017).
9. Parshall J. Production Method for Methane Hydrate Sees Scientific Success. *Journal of Petroleum Technology*, 2012, vol. 64, no. 8, pp. 50–51.

10. Schoderbek D., Farrell H., Hester K. Conoco Phillips Gas Hydrate Production Test Final Technical Report. *National Energy Technology Laboratory*, 2013. Available at: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2013reports/nt0006553-nalreport.pdf> (accessed 11 July 2017).
11. Doe/Netl Methane Hydrate Projects. Gas Hydrate Production Trial Using CO₂/CH₄ Exchange. *National Energy Technology Laboratory*, 2013. Available at: <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/methane-hydrates/mh-06553hydrateprodtrial> (accessed 22 July 2017).
12. US and Japan successfully complete Arctic field of gas hydrate production technology using CO₂ – methane exchange within structure. *Green Gas Congress press-release*, 2012. Available at: <http://www.greengascongress.com/2012/05/co2ch4-20120502.html> (accessed 21 July 2017).
13. Song Y., Wang F., Liu G., Luo S., Guo R. Controllable methane hydrate formation through trace carbon dioxide charging. *Fuel*, 2017, vol. 203, pp. 145–151.
14. Acerola S.M. Development of deposits of methane hydrates method of substitution of methane with carbon dioxide (materials of foreign literature). *Logger*, 2014, no. 8 (242), pp. 70–102. In Rus.
15. Khasanov M.K., Shagapov V.Sh. Methane Gas Hydrate Decomposition in a Porous Medium Upon Injection of a Warm Carbon Dioxide Gas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1123–1133.
16. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Ngoc Hai Duong. Theoretical research of the gas hydrate deposits development using the injection of carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 107, pp. 347–357.
17. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p.
18. Collins R.E. *Flow of Fluids through Porous Materials*. New York, Reinhold Publishing Corp., 1961. 270 p.
19. Khasanov M.K., Musakaev N.G., Gimaltdinov I.K. Features of the Decomposition of Gas Hydrates with the Formation of Ice in a Porous Medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 5, pp. 1052–1061.
20. Khasanov M.K. Investigation of regimes of gas hydrate formation in a porous medium, partially saturated with ice. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 245–255.
21. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Mathematical model of the formation of a gas hydrate on the injection of gas into a stratum partially saturated with ice. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, vol. 80, no. 1, pp. 57–64.
22. Tsyppin G.G. Formation of carbon dioxide hydrate at the injection of carbon dioxide into a depleted hydrocarbon field. *Fluid Dynamic*, 2014, vol. 49, no 6, pp. 789–795.
23. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates under Natural Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p.
24. Nigmatulin R.I. *Dynamics of Multiphase Media*. New York, Hemisphere Publ. Corp., 1991. 507 p.
25. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Theory of fluid flows through natural rocks*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990. 395 p.

Received 11 September 2017.

Information about the authors

Marat K. Khasanov, Cand. Sc., research scientist, Bashkir State University, Sterlitamak Branch.

Maxim V. Stolpovsky, Cand. Sc., research scientist, Bashkir State University, Sterlitamak Branch.

Svetlana R. Kildibaeva, Cand. Sc., research scientist, Bashkir State University, Sterlitamak Branch.

Ilyas K. Gimaltdinov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 622.276

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ПОДБОРА РЕАГЕНТОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ АСФАЛЬТЕНОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В МЕХАНИЗИРОВАННЫХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИНАХ

Сюзев Андрей Викторович¹,
sphinxand@gmail.com

Лекомцев Александр Викторович¹,
alex.lekomtsev@mail.ru

Мартюшев Дмитрий Александрович¹,
martyushevdm@inbox.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

Актуальность работы обусловлена тем, что более 70 % процентов ремонтов скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» проводят по причине асфальтеносмолопарафиновых отложений. В настоящее время в условиях многообразия составов и свойств скважинной продукции не существует строго определенных технологий для полного удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений со стенок внутрискважинного оборудования. Комплексный подбор реагентов и разработка технологий для очистки глубоко-насосного оборудования от асфальтеносмолопарафиновых отложений являются приоритетными задачами для месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», позволяющими снизить временные и экономические затраты.

Цель работы: разработка комплексного метода подбора технологии удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений в механизированных нефтедобывающих скважинах.

Методы исследования. Работа выполнена в соответствии со стандартными и разработанными методиками проведения экспериментальных исследований растворяющей и диспергирующей способности реагентов по отношению к асфальтеносмолопарафиновым отложениям (исследование процессов удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений с поверхностей, имитирующих внутрискважинное оборудование, исследование процессов адсорбции и десорбции частиц асфальтеносмолопарафиновых отложений на внутрискважинном оборудовании).

Результаты. Определены основные методики подбора технологии борьбы с асфальтеносмолопарафиновыми отложениями на скважинах. Приведены вещества, которые повышают отмывающую способность и эффективность состава для удаления АСПО. Разработана блок-схема последовательности действий подбора реагента для борьбы с асфальтеносмолопарафиновыми отложениями, использование которой повысит эффективность операций по очистке внутрискважинного оборудования. Представлена классификация успешности операций, исходя из которой получены максимальные межочистные периоды в зависимости от межремонтного периода для различных по дебиту механизированных скважин. Использование разработанной методики позволит рассчитать максимальную продолжительность работы скважины с высокой точностью, предотвратить отказ, остановку и внеплановые ремонты.

Ключевые слова:

Асфальтеносмолопарафиновые отложения, межремонтный период, нефтедобывающие скважины, блок-схема подбора реагента, интенсивность отложений парафина.

Введение

В нефтяной промышленности актуальным вопросом является борьба с отложениями асфальтосмолопарафиновых веществ (АСПО). На месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» более 3000 скважин осложнены АСПО. В 76 % случаях ремонты скважин проводят именно по этой причине.

В настоящее время в условиях многообразия составов и свойств скважинной продукции не существует строго определенных технологий для полного удаления АСПО со стенок внутрискважинного оборудования. Наиболее распространенным методом являются промывки скважин для удаления отложений, которые включают промывки горячей нефтью (ГН), горячей водой с ПАВ (ГВ+ПАВ) или углеводородными растворителями (УВР) [1–6].

Наибольший технологический эффект от операций по удалению отложений наблюдается при комбинированном использовании тепловых и хи-

мических методов, однако такая операция может быть экономически нецелесообразна. Ввиду этого возникает острая необходимость в поиске способа подбора технологии удаления АСПО с учетом экономического и технологического эффекта от мероприятия.

Оценка технологической эффективности промывки скважин осуществляется по нескольким критериям:

1. Восстановление дебита после промывки.
2. Ликвидация отставания полированного штока.
3. Снижение давления во время закачки.
4. Восстановление «рабочей» динамограммы.
5. Восстановление проходимости скребка в насосно-компрессорных трубах (НКТ).
6. Снижение нагрузки на электроцентробежный насос (ЭЦН).

Основным критерием для оценки является результат контрольного замера дебита скважины после проведения обработки. Не всегда такие показате-

тели, как восстановление «рабочей» динамограммы или отсутствие отставания полированного штока, указывают на ликвидацию проблемы с АСПО. Проблема, связанная с удалением АСПО в скважине, заключается не только в удалении органических веществ с поверхности трубопровода и глубинно-насосного оборудования (ГНО), но и в сложности выноса отмытых частиц из ствола скважины и предотвращения их выпадения из объема продукции в системе сбора и транспорта нефтепродукта. Для решения проблемы перед применением химических реагентов на скважине необходимо оценивать растворяющую и диспергирующую способность агента, значение удельного насыщения парафином растворителя и скорость выноса отмытых частиц из скважины. Известны случаи, когда после промывки скважины горячей нефтью через некоторый период времени (от нескольких часов до нескольких суток) происходило оседание частиц АСПО на насосном оборудовании, что приводило к выходу его из строя [7–11].

Проведение наиболее эффективной технологии промывки позволит избежать негативных последствий. Для заданных условий в настоящее время на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» применяются промывки двух видов: статическая и динамическая, описание которых приведено в табл. 1.

При выполнении лабораторных испытаний необходимо определять скорость седиментации отмытых частиц АСПО. При высоких скоростях требуется растворитель с высокой растворяющей и диспергирующей способностью в сочетании с динамическим способом промывки. При средней скорости седиментации рекомендуется растворитель с высокой растворяющей и диспергирующей способностью, но промывка может производиться как динамическим, так и статическим способом. При малой скорости седиментации или ее отсутствии (полное растворение либо диспергация кристаллов в объеме растворителя) разрешается применять статические методы, которые в целом более выгодны, чем динамические за счет уменьшения количества реагента.

Совместимость реагента с пластовыми водами является важным параметром в подборе агента для очистки скважины от АСПО. При несоблюдении правила «подобное растворяется в подобном» возможно выпадение осадка. При малом массовом количестве образовавшегося осадка он не влияет на работу внутрискважинного оборудования, но в больших массовых объемах может привести к аварии и последующему ремонту скважины. В худшем случае может произойти кольматация призабойной зоны пласта (ПЗП), ликвидация осложнения потребует больших материально-технических затрат.

Важно следить за коррозионной активностью реагента, для этого требуется добавлять в агрессивные составы антикоррозийную присадку, а также не допускать заражения скважины сульфатредуцирующей бактерией. Для того чтобы избежать

этого рекомендуется при использовании пресных вод применять бактерицид.

Таблица 1. Виды промывок

Table 1. Flushing-out of well

Вид промывки Flushing-out of well	Описание Description
Статическая Static	Закачка растворителя в межтрубное пространство с продавкой либо без продавки через прием насоса нефтью или водой Solvent injection into the annular space with or without selling through reception of the pump by oil or water
	Нагнетание растворителя в трубное пространство НКТ со срывом насоса или с использованием специального клапана устройства выше подвески насоса Solvent injection into tubing space of tubing with pump disruption or using a special device valve above the pump bracket
	Промывка растворителя через НКТ после подъема насоса и штанг при проведении подземного ремонта скважин (ПРС) Washing the solvent through the tubing after lifting the pump and rods during underground well workover
Динамическая Dynamic	Закачка растворителя в затрубное пространство с последующей циркуляцией по схеме «затрубное пространство – НКТ – устье скважины – затрубное пространство» Solvent injection into the annular space followed by circulation according to the chain «annulus – tubing – wellhead – annulus»

С учетом анализа приведенных аспектов качественного подбора растворителя сформулирован алгоритм подбора реагента для очистки поверхности оборудования от АСПВ на основе опыта эксплуатации осложненных скважин.

На данный момент обработка скважины УВР в несколько раз дороже, чем промывка горячей нефтью либо горячим водным раствором ПАВ. Поэтому первоначально необходимо определить параметры и эффективность, влияющие на возможность применения тепловых промывок.

- температуростойкость ГНО;
- наличие примесей в АСПО;
- температура плавления АСПО;
- диспергирующая способность агента.

В случае, когда горячие промывки уже были проведены на скважине, необходимо учитывать опыт как определяющий параметр для выбора реагента.

Подбор химического реагента для удаления АСПО при промывке

Горячие промывки для удаления АСПО применяются повсеместно, промывки горячей нефтью и водой с ПАВ достаточно эффективны и относительно дешевы. Один из главных недостатков горячих промывок – слабая эффективность на скважинах средней и большой глубины из-за остывания реагента в процессе закачки. Так, средняя теплоемкость нефти в Пермском крае 1,7–2,1 кДж/(К·кг),

однако в качестве теплоносителя можно использовать воду, теплоемкость которой в 2 раза больше. Тепловые расчеты показывают, что при промывке через затрубное пространство с использованием в качестве теплоносителя воды, температура реагента на устье составляет примерно 60 °С.

Задача подбора реагента для борьбы с АСПО является весьма сложной и трудоемкой в связи с тем, что возникает необходимость подбора составов для строго конкретных условий. Особо актуальным вопросом является применение состава, позволяющего не только удалять, но и предотвращать образование АСПО на стенках НКТ.

Применение горячих промывок реагентом на водной основе имеет ряд преимуществ:

- увеличение межочистного периода (МОП);
- большая теплоемкость теплоносителя;
- снижения стоимость обработки оборудования;
- удобство транспортировки реагента в сухом виде;
- простота изготовления композиции на водной основе на скважине;
- универсальность состава и возможность применения на поверхности оборудования из металла, стеклопластика, полиэтилена и др.

Авторами разработан реагент на водной основе, который в сравнении с аналогами характеризуется повышенной степенью удаления АСПО с поверхности оборудования, повышает МОП. Для защиты от сульфатредуцирующих бактерий в реагенте присутствует антибактериальная добавка. Реагент на водной основе обеспечивает инкапсуляцию кристаллов парафина в своем объеме, препятствует их седиментации и выпадению из объема во всем технологическом процессе транспорта скважинной продукции.

Исследования показывают, что водные растворы для борьбы с АСПО приготовленные на основе пластовой воды, имеют большую отмывающую способность, чем те же, приготовленные на основе пресной воды. На месторождениях Пермского края не всегда имеется возможность использования пресной воды, поэтому предусмотрены варианты приготовления реагента на воде различной минерализации. Таким образом, предлагаемый реагент обладает универсальностью (для удаления различных составов АСПО), и имеется возможность комбинации компонентов без потери общей отмывающей эффективности.

На сегодняшний момент не представляется возможным выбрать единственный УВР для скважин всего месторождения. По результатам лабораторных испытаний должно определяться несколько аналогичных УВР с наибольшей степенью удаления АСПО, выбор между которыми будет осуществлен уже исходя из наилучших экономических показателей с учетом распределения парафинов (П), смол (С), асфальтенов (А) в пробе АСПО. Классификация АСПО, отражающая содержание в них органических компонентов. Выделяется три типа АСПО:

- асфальтеновый – $P/(A+C) < 1$;
- парафиновый – $P/(A+C) > 1$;
- смешанный – $P/(A+C) \approx 1$.

Данная классификация является несовершенной, так как в ней содержание смол и асфальтенов рассматривается только как совокупность $C+A$. В работе [12] приводятся параметры суммарного содержания смолисто-асфальтеновых веществ и их соотношение (C/A). Поскольку смолы и асфальтены характеризуются разной растворимостью в

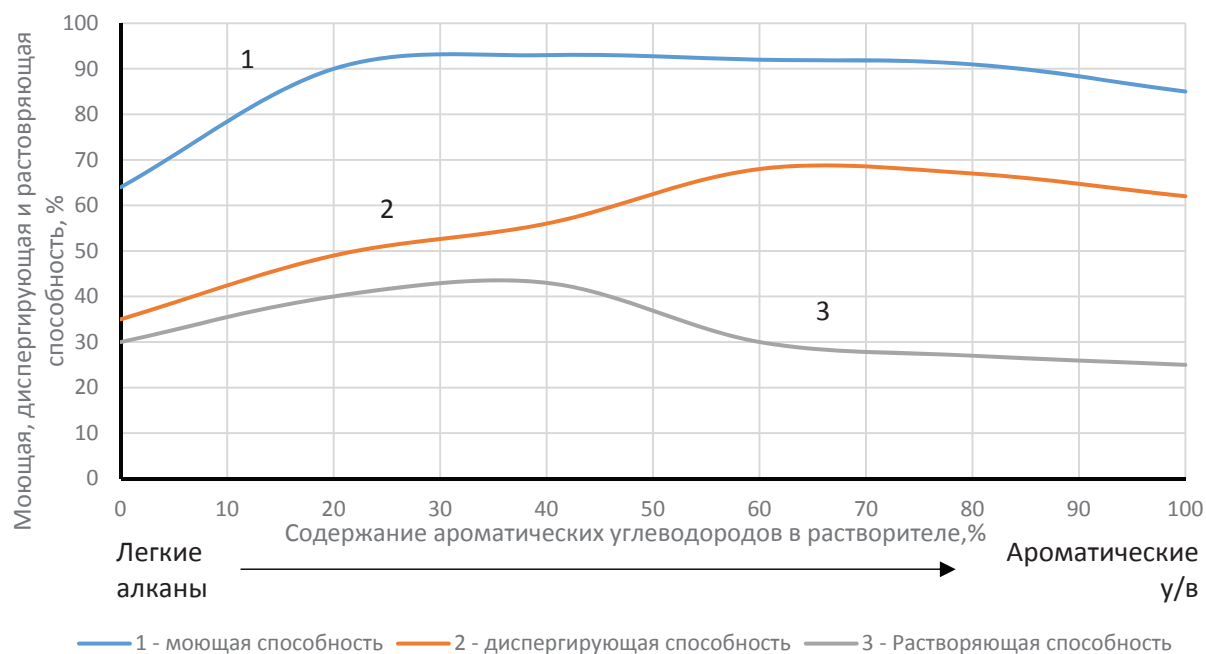


Рис. 1. График бинарных растворителей (общий вид)

Fig. 1. Graph of binary solvents (general view)

Таблица 2. Свойства и результат действия веществ, входящих в состав растворителей

Table 2. Properties and result of actions of substances that make up solvents

Характеристика Characteristic	Полярные/Polar	Неполярные/Nonpolar	
	Парафины/Paraffins	Смолы/Resins	Асфальтены/Asphaltenes
Наибольшее удаление Maximum removal	Легкие алкановые углеводороды Light alkane hydrocarbons	Алканы+ароматика Alkane+aromatics	Ароматические углеводороды Aromatic hydrocarbons
Наибольшее содержание противоположного вещества The largest content of the opposite substance	До 40 % бензола (не ухудшает) Up to 40 % benzene (does not worsen)	Равные соотношения Equal ratio	До 30 % алканов (не ухудшается растворение) Up to 30 % of alkanes do not deteriorate dissolution
Добавление ПАВ Addition of surfactants	Мутная дисперсия (в алканах) Turbid dispersion (in alkanes)	Полное растворение+повышение эффективности Complete dissolution+increase in efficiency	
Полярные неэлектролиты (ацетон, метанол, этанол) Polar nonelectrolytes (Acetone, methanol, ethanol)	Проникновение в микротрещины парафина, высокий дипольный момент. Повышение растворяющей способности Penetration into microcracks of paraffin, high dipole moment. Increase of dissolving power	Повышение растворяющей способности Increase of dissolving power	Проникновение в межпакетное расстояние асфальтенов, высокий дипольный момент. Повышение растворяющей способности Penetration into inter-packet distance of asphaltenes, high dipole moment. Increase of dissolving power

углеводородных растворителях, асфальтены хорошо растворимы в ароматических и плохо растворимы в парафиновых (алкановых) углеводородах. Соотношение С/А может играть существенную роль при выборе растворителя для отмыва АСПО. Удобным подходом для подбора УВР является построение графика бинарных растворителей (рис. 1). Метод основан на том, что любые АСПВ растворяются в простейших растворителях, ароматических либо алкановых углеводородах [8].

Выбор оптимальной области зависит, во-первых, от моющей способности, для данного типа АСПО границы максимальной отмывающей способности находятся в пределах 20–80 % содержания ароматических углеводородов в растворителе. Высокая диспергирующая способность растворителя позволяет использовать растворитель несколько раз после его очистки от оставшегося АСПО, а высокая растворяющая способность уменьшит содержание твердой фазы АСПО в растворителе.

Подбор комбинации осуществляется аналитически и по результатам химических опытов. Испытания предусматривают:

- построение графика бинарных растворителей (рис. 1);
- оценку растворяющей способности на основе метода «сетчатых корзинок»;
- тесты на совместимость растворителя со скважинной продукцией (смешивание реагента и флюида);
- опыт с растворением АСПО в готовом растворителе по методу сравнения масс АСПО, нанесенного на стальные пластинки и оставшегося на них после операции.

Формирование растворяющей основы реагента осуществляется для каждого компонента АСПО (А, С, П), учитывая полярность веществ. Применение данного метода представляет собой создание нового растворителя путем комбинации основных веществ: легких алканов, ароматических углеводородов, полярных неэлектролитов, ПАВ, антикоррозийные и антибактериальные добавки.

Таблица 3. Характеристика химических реагентов, повышающих эффективность растворителей

Table 3. Characteristics of chemical reagents increasing the effectiveness of solvents

Химическое вещество Chemical agent	Функциональная характеристика Functional characteristic	Метод достижения Method of achieving
Гексан, бензин Hexane, gasoline	Истинное растворение в композиции растворителя True dissolution in solvent composition	Добавление необходимого количества ароматических углеводородов Adding the required amount of aromatic hydrocarbons
Неионогенные и катионные ПАВ Nonionic and cationic surfactants	Усиление растворяющей способности растворителя Enhancement of solvent capacity	Добавление ПАВ, в результате чего повышается проникающая способность растворителя Addition of surfactants that results in increasing penetrating power of solvent
Любые неионогенные ПАВ Any non-ionic surfactants	Снижение степени коагуляции АСПО Reduction of coagulation degree of asphalt-resin-paraffin sediments	Модификация адсорбционно-сольватными солями ПАВ Modification of adsorption-solvate salts of surfactants
Ингибитор коррозии Corrosion inhibitor	Замедляет течение коррозионных процессов на поверхности ГНО Do not accelerate corrosion on the surface of deep-pumping equipment	Добавление ингибитора коррозии Addition of a corrosion inhibitor

Соотношение растворителей в готовом реагенте должно быть пропорционально массовой доле компонентов АСПВ. Например, если АСПО парафинового типа с содержанием парафина 40 %, то и в составе растворителя должно быть не менее 40 % легких алкановых углеводородов либо аналога [13–16].

В табл. 2 указаны параметры растворения веществ, составляющих АСПВ, влияние ПАВ и полярных неэлектролитов на растворение.

Добавление в композицию компонентов неионогенных ПАВ оказывает положительный эффект, увеличивается степень удаления АСПО с оборудования на 5–30 % [2].

В табл. 3 указаны ПАВ, которые увеличивают эффективность удаления АСПО.

Добавление в композицию полярных неэлектролитов увеличивает моющую способность.

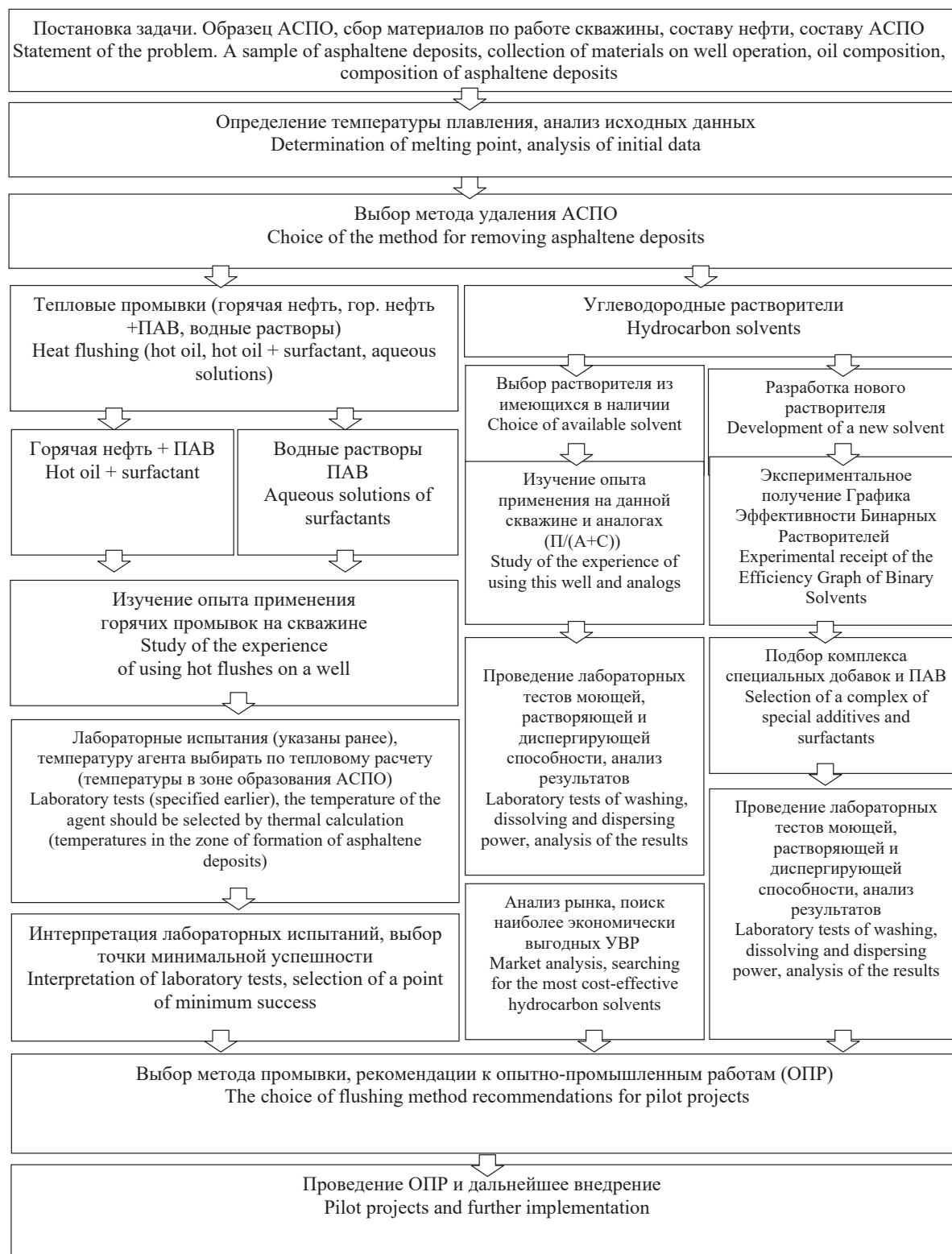


Рис. 2. Блок-схема последовательности действий при подборе реагентов для борьбы с АСПО

Fig. 2. Block diagram of the sequence of actions in selection of reagents for controlling asphaltic-resinous paraffin deposits

Эти вещества имеют высокий дипольный момент, что позволяет им проникать в кристаллы парафина и межпакетное расстояние асфальтенов. На молекулярном уровне они окружают частицу АСПВ и помогают ей выйти из состава отложения [17–20].

В качестве полярного неэлектролита может быть использован алифатический спирт, выбранный из группы спиртов (метилловый, изопропиловый, бутиловый, изобутиловый).

На рис. 2 представлена блок-схема подбора реагента для удаления АСПО. Представленные в блок-схеме лабораторные испытания не требуют значительной и дорогостоящей материально-технической базы.

На схеме показаны основные пути подбора реагентов и растворителей для проведения промывок на скважинах. Слева направо увеличивается стоимость реагентов, но также и повышается вероятность успешности операции.

Данная схема подбора способа борьбы с АСПО позволяют увеличить (до 30 %) эффективность очистки трубопроводов и ГНО. Отмывающая способность АСПО является основным фактором, определяющим частоту промывок и межочистный период.

Нефтедобывающие компании используют параметр МОП как характеристику средней работоспособности скважин с момента запуска (обработки) до отказа по причине образования АСПО, однако такой показатель принято называть межремонтный период (МРП). В большинстве случаев операции по удалению АСПО проводят через определенный для каждой скважины срок, который получен опытным путем. Таким образом, использование ранее не применяемых реагентов без проведения лабораторных исследований может сопровождаться отказом ГНО и последующим ремонтом скважины. Авторами предложен подход оценки МОП на основе анализа истории работы скважины.

Для изучения процесса отложения АСПО воспользуемся следующими допущениями:

- скорость образования АСПО на единице поверхности постоянная;
- по мере нарастания слоя АСПО при постоянной удельной скорости образования отложений будет уменьшаться сечение трубопровода.

По результатам расчета изменения площади 1 м НКТ с учетом роста толщины органических отложений нельзя считать, что скорость нарастания отложений АСПВ одинаковая во всем МОП, так

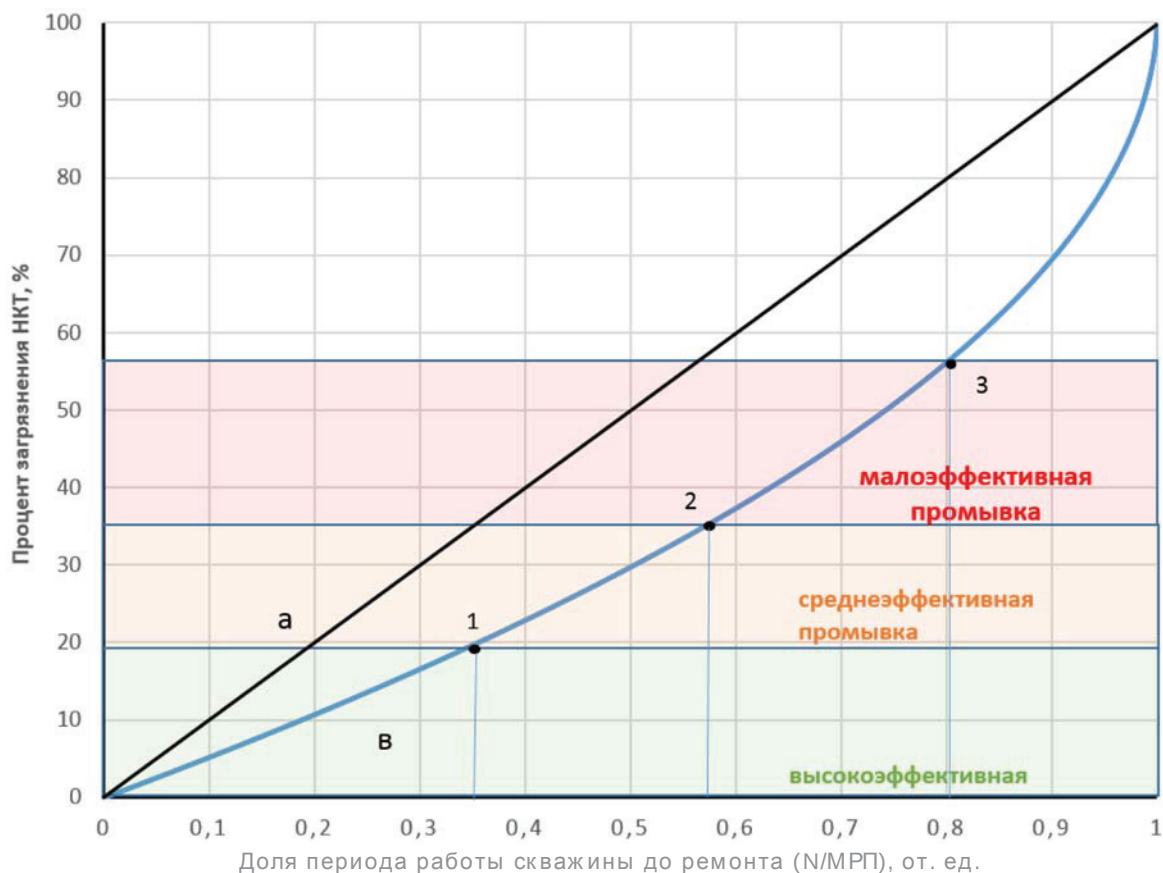


Рис. 3. График интенсивности отложения АСПО в НКТ: а) линия, характеризующая равномерное нарастание слоя АСПО в течение срока между очистками; в) линия, полученная в результате проведения расчета загрязнения НКТ по предложенной модели (1)

Fig. 3. Graph of intensity of deposition of asphalt-tar-paraffin deposits on tubing: а) line characterizing the uniform growth of the AFS layer during the time between cleaning; в) line, obtained as a result of calculation of tubing pollution by the proposed model (1)

как проходной диаметр НКТ уменьшается с увеличением толщины АСПО.

На основе вышесказанного предложена модель оценки степени загрязнения НКТ от удельного времени работы скважины до ее ремонта:

$$h_{\text{АСПО}}/d_{\text{НКТ}}=f(N/\text{МРП}), \quad (1)$$

где $h_{\text{АСПО}}$ – суммарная толщина отложений на внутренней поверхности НКТ, мм; $d_{\text{НКТ}}$ – внутренний диаметр НКТ, мм; N – количество суток работы скважины от момента пуска до ремонта по причине АСПО, сут; МРП – межремонтный период работы скважины, сут; f – коэффициент, который вносит поправку на различия в расчете скорости отложения АСПО между стандартной и предлагаемой моделью, вследствие уменьшения проходного сечения НКТ.

Коэффициент f получен в результате пересчета удельной скорости образования 1 мм АСПО в НКТ в условиях снижения проходного сечения скважины. На рис. 3 приведен график зависимости доли загрязненности НКТ от времени работы.

Отложения АСПВ на внутрискважинном оборудовании протекают нелинейно, вследствие изменения проходного сечения и площади внутренней поверхности НКТ. При неизменном дебите, температурном режиме и адгезионной активности АСПО возможно описание данного процесса графически, изменяя сечение при расчете от чистой до полностью заполненной НКТ, получена зависимость, представленная на рис. 3 линией В.

На графике ось $N/\text{МРП}$ обозначает временной промежуток, где 0 соответствует моменту окончания ремонта, когда на НКТ отсутствуют АСПО; 1 – полное перекрытие проходного сечения НКТ. Линия a показывает расчет МРП по стандартному методу, используемому в производственной практике, который характеризует равномерное нарастание слоя АСПО в течении срока между очистками.

При анализе линии b на рис. 3 можно выделить три точки: 1) показывает окончание интервала с минимальной интенсивностью образования отложений АСПВ; 2, 3) соответствуют началу и концу условно линейного участка.

По результатам гидравлического расчета оценены допустимые границы толщины АСПО без существенной потери в добыче скважины. Допускается уменьшение проходного сечения в НКТ до критического значения (выражено в процентах от начального диаметра НКТ 73×5,5) для следующих условий:

- малодобитные скважины (до 5 м³/сут) – 10 %;
- среднедебитные скважины (5–50 м³/сут) – 22 %;
- высокодебитные скважины (более 50 м³/сут) – 29 %.

По оценочным значениям критической степени загрязнения можно определить время работы осложнённой АСПО скважины в безаварийном режиме. Для мало-, средне- и высокодебитных скважин этот параметр составляет 0,97; 0,94; 0,91 от МРП.

Для оценки требуемой глубины очистки оборудования от органических отложений после проведения промывки выбрано три интервала по остаточной загрязненности НКТ. Операции в диапазоне 0–20 % остаточных загрязнений можно считать высокоэффективными; в пределах 20–35 % – среднеэффективными; в интервале 35–55 % – малоэффективными. Промывки, после проведения которых остается более 55 % АСПО, неэффективны, так как скорость роста отложений после запуска скважины в эксплуатацию будет наибольшей. Данный график показывает, что начало работы скважины после проведения промывки должно располагаться в пределах максимальной эффективности $N/\text{МРП}$ 0...0,35 от. ед., то есть с наличием остаточного загрязнения после промывки не более 20 %.

Методика проведения промывки для очистки скважины от АСПО

Методика промывки скважины углеводородными растворителями не отличается от описанной в регламентах по промывкам, применяемым на нефтедобывающих предприятиях, за исключением, что в начале проводят отбор проб и лабораторные испытания, в результате которых подбирается реагент с наиболее высокой эффективностью по растворению АСПО. Методика промывки скважины водным раствором предусматривает следующие шаги:

1. Отбор проб скважинной продукции (нефть, парафин) со скважины, планируемой для проведения обработки.
2. Отбор пробы пластовой воды с объекта, где планируется проведение обработки, с целью оценки совместимости с реагентом.
3. По итогам лабораторных исследований производится подбор оптимального состава (оптимальной концентрации основного реагента) для проведения ОПР на скважине.
4. Расчет необходимого количества воды и реагента для промывки скважины.
5. Температурный режим водного раствора для скважин:
 - с УШГН: не менее 90 °С;
 - с УЭЦН: не более 90 °С.
6. Проведение промывки в динамическом режиме в течении 4 часов.
7. Запуск скважины в работу и удаление водного раствора с инкапсулированным АСПО.
8. Эффект от проведенной операции оценивается по степени удаления АСПО.

Заключение

В результате проведения исследований определены основные методики подбора реагентов и растворителей для борьбы с АСПО на скважинах. Приведены вещества, которые повышают отмывающую способность и эффективность реагентов. Разработана блок-схема последовательности действий подбора реагента для борьбы с АСПО, ис-

пользование которой повысит эффективность операции по очистке внутрискважинного оборудования. Подход к расчету межочистного периода скважины прост в применении. При наличии данных о МРП и отказах ГНО по причине АСПО можно рассчитывать максимальную продолжительность работы скважины с высокой точностью, предотвратить отказ, остановку и внеплановые ремонты. Предлагаемые на рынке растворители и реагенты для растворения и удаления АСПО в редких случаях до-

стигают своих заявляемых показателей эффективности удаления в районе 90–95 %, предлагаемая методика позволит производить подбор растворителей и реагентов с наибольшей эффективностью, учитывая, в первую очередь, свойства АСПО для каждой скважины. При сопоставлении разработанной методики и эффективности от проведенной операции рекомендуется использование графического метода оценки МОП, позволяющего определить время следующей промывки скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективность мероприятий по предупреждению образования и удалению асфальтеносмолопарафиновых отложений при эксплуатации нефтедобывающих скважин в ООО «ЛУКОЙЛ – Пермь» / В.А. Мордвинов, М.С. Турбаков, А.В. Лекомцев, Л.В. Сергеева // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 78–79.
2. Глущенко В.Н., Силин М.А., Герин Ю.Г. Предупреждение и устранение асфальтеносмолопарафиновых отложений. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – 475 с.
3. Вяткин К.А., Лекомцев А.В. Оценка эффективности способов утилизации нефтесодержащих отходов // Экология урбанизированных территорий. – 2014. – № 1. – С. 25–29.
4. Lixin Xia, Shiwei Lu, Guoying Cao. Stability and demulsification of emulsions stabilized by asphaltenes or resins // Journal of Colloid and Interface Science. – 15 March 2004. – V. 271. – Iss. 2. – P. 504–506.
5. Determination of volatile and non-volatile nickel and vanadium compounds in crude oil using electrothermal atomic absorption spectrometry after oil fractionation into saturates, aromatics, resins and asphaltenes / M.G.R. Vale, M.M. Silva, I.C.F. Damin, P.J.S. Filho, B. Welz // Talanta. – 15 February 2008. – V. 74. – Iss. 5. – P. 1385–1391.
6. Adsorption of asphaltenes and resins on organic and inorganic substrates and their correlation with precipitation problems in production well tubing / S. Acevedo, M.A. Ranaudo, G. Escobar, L. Gutiérrez, P. Ortega // Fuel. – April 1995. – V. 74. – Iss. 4. – P. 595–598.
7. Вяткин К.А., Мартюшев Д.А., Лекомцев А.В. Технология очистки НКТ от асфальтеносмолопарафиновых отложений с последующей их утилизацией // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 36–38.
8. Trejo F., Rana M.S., Ancheyta J. Thermogravimetric determination of coke from asphaltene, resins and sediments and coking kinetics of heavy crude asphaltenes // Catalysis Today. – 30 March 2010. – V. 150. – Iss. 3–4. – P. 272–278.
9. Effects of asphaltenes and organic acids on crude oil-brine interfacial visco-elasticity and oil recovery in low-salinity waterflooding / G. Garcia-Olvera, T.M. Reilly, T.E. Lehmann, V. Alvarado // Fuel. – 1 December 2016. – V. 185. – P. 151–163.
10. Sjöblom J., Simon S., Xu Z. Model molecules mimicking asphaltenes // Advances in Colloid and Interface Science. – April 2015. – V. 218. – P. 1–16.
11. Conversions of resins and asphaltenes in porous catalysts / A. De Stefanis, G. Perez, E. Lilla, O. Ursini, A.A.G. Tomlinson // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – January 2001. – V. 57. – Iss. 1. – P. 37–44.
12. Иванова Л.В., Кошелев В.Н., Стоколос О.А. Исследование состава асфальтеносмолопарафиновых отложений различной природы и пути их использования // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 2. – С. 250–256.
13. Туркалов М.Б. Критерии выбора эффективных углеводородных растворителей для удаления асфальтеносмолопарафиновых отложений: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Краснодар, 2007. – 24 с.
14. Чеников И.В. Химия и физика нефти (Равновесные структуры в нефти и нефтепродуктах). – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2004. – 86 с.
15. Тронов В.П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. – М.: Недра, 1970. – 192 с.
16. Выбор методов (технологий) для реализации комплексной программы работ по предотвращению и удалению АСПО на месторождениях Вала Гамбурцева ОАО «Северная нефть» по выполненному этапу 2: Информационный отчет / В.М. Строганов, А.В. Сахань, М.Б. Турукалов, А.М. Строганов, В.П. Алишанян. – Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2003. – 156 с.
17. Hydrocarbon composition and structural parameters of resins and asphaltenes of naphthenic oils of northern / G.S. Pevneva, E.A. Fursenko, N.G. Voronetskaya, M.V. Mozhauskaya, A.K. Golovko, I.I. Nesterov, V.A. Kashirtsev, N.P. Shevchenko // West Siberia Russian Geology and Geophysics. – April 2017. – V. 58. – Iss. 3–4. – P. 425–433.
18. Aguiar J.I.S., Mansur C.R.E. Study of the interaction between asphaltenes and resins by microcalorimetry and ultraviolet-visible spectroscopy // Fuel. – 15 January 2015. – V. 140. – P. 462–469.
19. Combustion properties of saturates, aromatics, resins and asphaltenes in asphalt binder / Huaquan Shi, Tao Xu, Pei Zhou, Ruiling Jiang // Construction and Building Materials. – 1 April 2017. – V. 136. – P. 515–523.
20. Hashmi S.M., Firoozabadi A. Self-assembly of resins and asphaltenes facilitates asphaltene dissolution by an organic acid // Journal of Colloid and Interface Science. – 15 March 2013. – V. 394. – P. 115–123.

Поступила 20.09.2017 г.

Информация об авторах

Сюзев А.В., студент кафедры нефтегазовых технологий Горно-нефтяного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Лекомцев А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Мартюшев Д.А., старший преподаватель кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

COMPLEX METHOD OF SELECTING REAGENTS TO DELETE ASPHALTENOSMOLAPARININE DEPOSITS IN MECHANIZED OIL-PRODUCING WELLS

Andrey V. Syuzev¹,
sphinxand@gmail.com

Aleksandr V. Lekomtsev¹,
alex.lekomtsev@mail.ru

Dmitry A. Martyshev¹,
martyshevdi@inbox.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation.

The relevance of the discussed issue is caused by the fact that more than 70 % of wells at the FFC «LUKOIL-PERM» fields are repaired because of asphaltenosmoloparaffin sediments. At present, in the conditions of a variety of compositions and properties of well production there are no strictly defined technologies for complete removal of asphaltenosmoloparaffin sediments from the walls of downhole equipment. Comprehensive selection of reagents and development of technologies for cleaning deep-pumping equipment from asphaltenosmoloparaffin sediments are the priority tasks for the FFC «LUKOIL-PERM» fields. This can reduce the time and economic costs.

The main aim of the study is to develop a comprehensive method for selecting asphaltenosmoloparaffin deposition removal technology in mechanized oil wells.

The methods. The work was performed in accordance with standard and developed methods for carrying out experimental studies of the dissolving and dispersing power of reagents relative to asphaltenosmoloparaffin sediments (studying the asphaltenosmoloparaffin sediments removal from surfaces simulating downhole equipment, investigation of adsorption and desorption of asphaltenosmoloparaffin sediments particles in downhole equipment).

The results. The authors have determined the main methods of selecting the technology for fighting with asphaltenosmoloparaffin sediments in wells. There are substances that increase the washing capacity and the effectiveness of the composition. The authors developed the block diagram of a reagent selection for controlling asphaltenosmoloparaffin sediments. Its use will increase the efficiency of cleaning downhole equipment. The paper introduces the classification of success of operations. Based on this classification the maximum periods of the interclear period were obtained, depending on the between-repair period for various wells drilled in the flow rate. Using the developed methodology will allow calculating the maximum duration of the well with high accuracy, preventing failure, shutting down wells and unscheduled repairs.

Key words:

Asphaltenosmoloparaffin sediments, period between repairs, oil producing wells, block diagram of reagent selection, intensity of paraffin sediments.

REFERENCES

- Mordvinov V.A., Turbakov M.S., Lekomtsev A.V., Sergeeva L.V. Efficiency of measures to prevent the formation and removal of asphaltene-osmol-paraffinic deposits during the exploitation of oil-producing wells in LLC LUKOIL-Perm. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2008, no. 8, pp. 78–79. In Rus.
- Glushchenko V.N., Silin M.A., Gerin Yu.G. *Preduprezhdenie i ustranenie asfaltenosmoloparaffinovykh otlozheniy* [Prevention and removal of asphaltene-osmoloparaffin deposits]. Moscow, Interkontakt Nauka Publ., 2009. 475 p.
- Vyatkin K.A., Lekomtsev A.V. Evaluation of the effectiveness of methods of utilization of oily waste. *Ecology of urbanized territories*, 2014, no. 1, pp. 25–29. In Rus.
- Lixin Xia, Shiwei Lu, Guoying Cao Stability and demulsification of emulsions stabilized by asphaltenes or resins. *Journal of Colloid and Interface Science*, 15 March 2004, vol. 271, Iss. 2, pp. 504–506.
- Vale M.G.R., Silva M.M., Damin I.C.F., Filho P.J.S., Welz B. Determination of volatile and non-volatile nickel and vanadium compounds in crude oil using electrothermal atomic absorption spectrometry after oil fractionation into saturates, aromatics, resins and asphaltenes. *Talanta*, 15 February 2008, vol. 74, Iss. 5, pp. 1385–1391.
- Acevedo S., Ranaudo M.A., Escobar G., Gutiérrez L., Ortega P. Adsorption of asphaltenes and resins on organic and inorganic substrates and their correlation with precipitation problems in production well tubing. *Fuel*, April 1995, vol. 74, Iss. 4, pp. 595–598.
- Vyatkin K.A., Martyshev D.A., Lekomtsev A.V. Technology of cleaning the tubing from asphalt-tar-paraffin deposits with subsequent disposal. *Oil industry*, 2015, no. 3, pp. 36–38. In Rus.
- Trejo F., Rana M.S., Ancheyta J. Thermogravimetric determination of coke from asphaltene, resins and sediments and coking kinetics of heavy crude asphaltenes. *Catalysis Today*, 30 March 2010, vol. 150, Iss. 3–4, pp. 272–278.
- Garcia-Olvera G., Reilly T.M., Lehmann T.E., Alvarado V. Effects of asphaltenes and organic acids on crude oil-brine interfacial visco-elasticity and oil recovery in low-salinity waterflooding. *Fuel*, 1 December 2016, vol. 185, pp. 151–163.
- Sjöblom J., Simon S., Xu Z. Model molecules mimicking asphaltenes. *Advances in Colloid and Interface Science*, April 2015, vol. 218, pp. 1–16.
- De Stefanis A., Perez G., Lilla E., Ursini O., Tomlinson A.A.G. Conversions of resins and asphaltenes in porous catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, January 2001, vol. 57, Iss. 1, pp. 37–44.
- Ivanova L.V., Koshelev V.N., Stokolos O.A. Investigation of the composition of asphalt-resin-paraffin deposits of different natu-

- re and the ways of their use. *Neftegazovoye delo*, 2011, no. 2, pp. 250–256. In Rus.
13. Turkalov M.B. *Kriterii vybora effektivnykh uglevodorodnykh rastvoriteley dlya udaleniya asfalta-smolo-parafinovykh otlozheniy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Criteria for selection of effective hydrocarbon solvents for asphalt-tar-paraffin deposits. Cand. Diss. Abstract]. Krasnodar, 2007. 24 p.
 14. Chenikov I.V. *Khimiya i fizika nefti (Ravnovesnye struktury v nefiti i nefteproduktakh)* [Chemistry and physics of oil (Equilibrium structures in oil and oil products)]. Krasnodar, KubGTU Press, 2004. 86 p.
 15. Tronov V.P. *Mekhanizm obrazovaniya smolo-parafinovykh otlozheniy i borba s nimi* [Mechanism of formation of tar-paraffin deposits and their control]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 192 p.
 16. Stroganov V.M., Sakhan A.V., Turukalov M.B., Stroganov A.M., Alishanyan V.R. *Vybor metodov (tekhnologiy) dlya realizatsii kompleksnoy programmy rabot po predotvrashcheniyu i udaleniyu ASPO na mestorozhdeniyakh Vala Gamburtseva OAO «Severnaya neft» po vopolnennomu etapu 2: Informatsionnyy otchet* [Information report. Choice of methods (technologies) for implementation of a comprehensive program of prevention and removal of ASPO in Val Gamburtsev fields of Severnaya Neft OJSC in accordance with the completed stage 2]. Krasnodar, KubGTU Press, 2003. 156 p.
 17. Pevneva G.S., Fursenko E.A., Voronetskaya N.G., Mozhayskaya M.V., Golovko A.K., Nesterov I.I., Kashirtsev V.A., Shevchenko N.P. Hydrocarbon composition and structural parameters of resins and asphaltenes of naphthenic oils of northern. *West Siberia Russian Geology and Geophysics*, April 2017, vol. 58, Iss. 3–4, pp. 425–433.
 18. Aguiar J.I.S., Mansur C.R.E. Study of the interaction between asphaltenes and resins by microcalorimetry and ultraviolet–visible spectroscopy. *Fuel*, 15 January 2015, vol. 140, pp. 462–469.
 19. Huaquan Shi, Tao Xu, Pei Zhou, Ruiling Jiang. Combustion properties of saturates, aromatics, resins and asphaltenes in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 1 April 2017, vol. 136, pp. 515–523.
 20. Hashmi S.M., Firoozabadi A. Self-assembly of resins and asphaltenes facilitates asphaltene dissolution by an organic acid. *Journal of Colloid and Interface Science*, 15 March 2013, vol. 394, pp. 115–123.

Received: 20 September 2017.

Information about the authors

Andrey V. Syuzev, student, Perm National Research Polytechnic University.

Aleksandr V. Lekomtsev, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Dmitry A. Martyushev, senior lecturer, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 556.314

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОТЕРМОМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИННЫХ ТЕМПЕРАТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ТУВЫ

Шестакова Анастасия Викторовна,
ashest91@mail.ru

Гусева Наталья Владимировна,
guseva24@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена наличием широкого разнообразия геохимических геотермометров, используемых для оценки глубинных температур, и достоверностью их применения к различным химическим типам термальных вод.

Цель работы заключается в установлении применимости метода оценки глубинных температур циркуляции термальных вод с помощью геотермометров для разных химических типов на примере родников Восточной Тувы.

Методы исследования. Анализ химического состава вод выполнен в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ИПР ТПУ. Для проведения полного химического анализа использовались традиционные методы. Для оценки глубинных температур использовались геохимические геотермометры и расчеты индексов насыщения вод различными минералами в зависимости от температуры в программном комплексе Phreeqc.

Результаты. Проведенная оценка температурных условий гидротермальных систем Восточной Тувы показала, что, независимо от химических типов вод, кремниевые геотермометры прогнозировали более надежные температуры пласта для всех рассматриваемых термальных вод, по сравнению с другими геотермометрами. Выбор того или иного геотермометра определялся химическим типом вод, характером физико-химического равновесия в системе вода–порода и концентрацией основных элементов. Для сульфатных и гидрокарбонатных вод Тарыса и Уш-Белдира практически все геотермометры показали хорошую сходимость результатов, прогнозные температуры пласта составляют 120 и 130 °C на глубине 4,5 и 4,8 км соответственно. Такие же значения температур были получены методом расчета индекса насыщения в зависимости от температуры. Для гидрокарбонатных вод Чойгана определение достоверных глубинных температур с помощью катионных геотермометров оказалось затруднительным. В этом случае для вод с высокими концентрациями катионов надежную оценку температуры пласта обеспечивает кремниевый геотермометр. Температура, полученная по кремниевому геотермометру, подтвердилась и другим методом определения температуры – с помощью расчетов индексов насыщения вод, и составляет около 100 °C, при этом глубина формирования оценивается в 3 км.

Ключевые слова:

Термальные воды, геотермометры, гидротермальная система, химический состав, Тува.

Введение

Термальные воды привлекают большое внимание исследователей по всему миру с точки зрения изучения их широкого практического использования и наличия большого разнообразия флюидов разного ионного состава, которые формируются в геотермальных системах и активно участвуют в рудо- и минералообразовании. Кроме того, геотермальные ресурсы используются в качестве альтернативного источника энергии. Выработка геотермальной энергии в последнее время получила распространение в более чем 20 странах по всему миру. Например, в США, Филиппинах, Индонезии, Мексике, Новой Зеландии, Исландии и Италии до 50 % тепла, необходимого для отопления, обеспечивается за счет геотермальных вод [1, 2].

На территории России в отдельных районах Кавказа, Сибирского и Курило-Камчатского регионов сосредоточены значительные геотермальные ресурсы для производства электроэнергии. Республика Тыва обладает большим потенциалом для развития геотермальной энергетики, ее территория относится к продолжению Байкальской сейсмогенной рифтовой зоны (БРЗ), здесь на поверхности проявляются гидротермы, разгружающиеся по многочисленным разрывным наруше-

ниям в горных породах. Проявление термальных и субтермальных источников свидетельствует о высоких температурах и активном глубинном тепло-массопереносе в недрах Восточной Тувы [3]. Исследования особенностей формирования и распространения теплового потока в рассматриваемом регионе проводились ранее, в том числе и с применением изотопно-гелиевого метода [4]. В результате этих работ получены новые данные о значениях теплового потока по Тувинскому региону и выявлена обширная изотопно-гелиевая аномалия на востоке Тувы.

Эта тепловая аномалия является продолжением изотопно-гелиевой аномалии юго-западного фланга БРЗ, в пределах которой наблюдается проявление термальных вод, и с ней же связано развитие термальных вод северо-востока Тувы [3]. Кроме того, П.С. Бадминовым, А.И. Оргильяновым, Д. Ганчимэг (2011, 2013) и др. для Окинской гидротермальной системы, расположенной на западном фланге БРЗ, а также для некоторых термальных источников Хангая и Восточного Саяна, были оценены прогнозные температуры гидротерм и глубины их формирования с помощью геотермометров. Авторами было установлено пространственное совпадение расположения Окинской гидротер-

мальной системы с районом проявления молодого вулканизма, свидетельствующего о связи с единым источником тепла, где тепловые параметры, газовый и химический состав коррелируют с возрастом вулканизма [5].

Определение перспективности использования гидротермальных систем, а также оценка теплового состояния недр возможна с помощью установления величины глубинной температуры геотермальных систем. Универсальным и полезным геохимическим инструментом для прогнозирования равновесных температур геотермальных систем на стадии разведки и разработки производства геотермальной энергии являются геохимические геотермометры, представляющие собой уравнения, основанные на реакциях ионного обмена элементов, где химический состав вод термальных источников отражает господствующие глубинные пластовые условия.

На правильность оценки глубинных температур геотермометрами могут влиять неоднородности литологического состава пород, смешение термальных вод с холодными грунтовыми водами, неравновесность состава минеральных вод с водовмещающими породами, влияние углекислого газа – в этом случае оценка температуры оказывается сильно заниженными или завышенными [1, 6, 7].

Геотермометры широко используются при оценке температуры пласта, поскольку их применение является относительно простым и экономичным. Разработаны различные программы для расчета глубинных температур, такие как SolGeo (Италия), GEOTHERM (США), AquaChem (США), GeoT (США) и другие, в которых заложены различные геотермометрические уравнения. Однако наличие широкого изобилия таких уравнений (порядка 35 уравнений) и отсутствие четких условий их применения затрудняет интерпретацию результатов расчетов геотермометров [7].

В литературе предлагается применять различные виды геохимических геотермометров, а затем проверять полученные температуры с учетом химического состава вод и литологии региона, так как не все геотермометры обеспечивают надежную оценку пластовой температуры. В настоящее время в работах по оценке глубинных температур с помощью геотермометров авторы приводят аргументированные объяснения по выбору того или иного геотермометра. В результате геотермометрических расчетов глубинных температур и сравнения их с измеренными температурами на глубине в скважинах авторы пришли к выводу, что наиболее достоверные и приемлемые результаты дают Na-K геотермометры, расхождение температур составляет $\pm 20^\circ\text{C}$, что считается допустимым. Хорошая применимость Na-K геотермометров связана с тем, что такие процессы, как смешивание термальных и холодных грунтовых вод, процессы дегазации вод во время их подъема к поверхности, существенно не изменяют соотношение Na/K [7, 8]. Однако применение такого геотермометра может

быть ограничено в связи с наличием ионного обмена с минералами (в частности с глинистыми минералами), обогащением катионами Ca, Mg, Na, или из-за отсутствия равновесия в системе вода–порода [8]. Таким образом, выбор геотермометра для установления пластовой температуры определяется химическим типом вод и условиями химического равновесия [9].

В связи с этим целью данной работы является установление применимости метода оценки глубинных температур циркуляции термальных вод с помощью геотермометров для разных химических типов на примере родников Восточной Тувы.

Объекты исследования

Для проведения геотермометрической оценки геотермальной системы Восточной Тувы были изучены термальные родники лечебных природных комплексов Чойган, Уш-Белдир и Тарыс (рис. 1). Гидротермы указанных природных комплексов представляют собой единую гидротермальную систему, принадлежащую к юго-западному флангу Байкальской рифтовой зоны, которая образуется в результате нагрева подземных вод региональным тепловым полем в процессе их глубинной циркуляции [3]. Проявление термальных источников обусловлено образованием очаговых зон позднекайнозойского вулканизма, проявившегося в виде Восточно-Тувинского вулканического ареала, включающего Восточно-Тувинское лавовое нагорье. По всей вероятности, позиция Восточно-Тувинского вулканического ареала и контролируется единым крупным субмеридиональным разломом [10–12]. Согласно изотопно-гелиевой оценке, уровень теплового потока на территории Тарыса и Уш-Белдира составляет 68 мВт/м^2 , на Чойгане – 84 мВт/м^2 , что свидетельствует об аномальном прогревании недр Восточной Тувы [3].

Природный комплекс Чойган представляет собой месторождение углекислых холодных и термальных вод и располагается на северо-востоке Тувы недалеко от границы с Бурятией, на абсолютных отметках 1550–1570 м. Возникновение углекислых Чойганских источников связано с крупным широтным разломом в докембрийских породах (гнейсы, мраморы, сланцы), прорванных гранитами и диоритами палеозоя [13]. На небольшой территории располагается 33 родника с температурой на поверхности от 7 до 39°C , однако глубинные температуры вод значительно выше. Разгрузка подземных вод происходит преимущественно на правом берегу р. Аржан-Хем. Вокруг углекислых источников обширно развиты поля травертиновых отложений.

Начало изучения источников Чойгана связано с такими учеными, как И.С. Крыжин (1858), С.В. Обручев (1945), В.Г. Ткачук (1955), Е.В. Пиннекер (1966–1967). Последующие исследования источников проводились в 90-х гг. XX в. сотрудниками Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов (ТИКОПР СО РАН) под

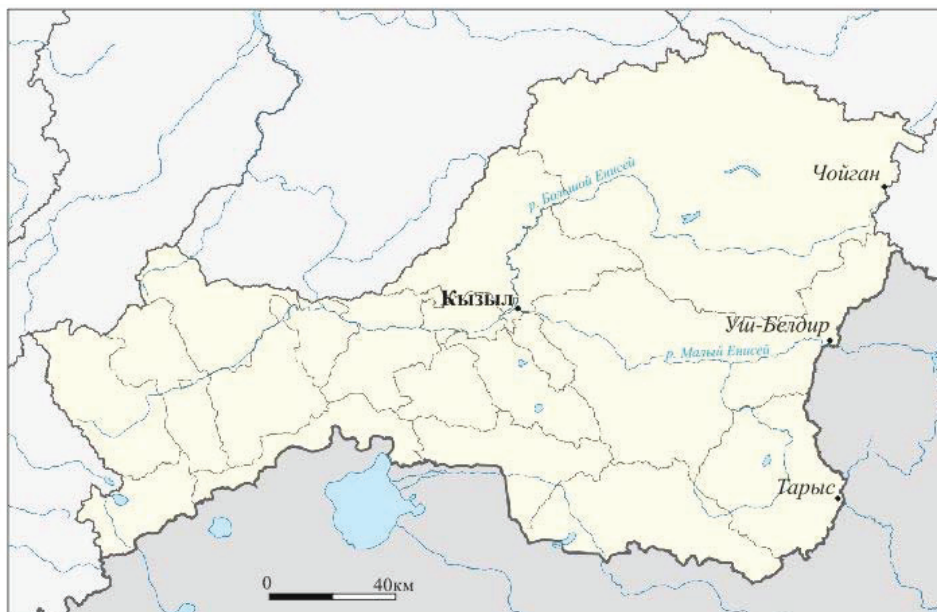


Рис. 1. Карта расположения природных комплексов Чойган, Уш-Белдир и Тарыс на территории республики Тыва

Fig. 1. Location map of natural spa complexes Choygan, Ush-Beldir and Tarys on the territory of the Republic of Tyva

руководством к.х.н. К.Д. Аракчаа и к.г.-м.н. К.С. Кужугета с привлечением ученых Иркутского государственного университета (руководитель – к.х.н. Г.М. Шпейзер) в 1989–1991 гг. и Томского политехнического университета (руководитель – к.г.-м.н. М.Б. Букаты) в 1992–1995 гг. Летом 2007 г. и в последующие годы изучение химического и газового состава родников Тувы было продолжено сотрудниками ТИКОПР СО РАН с участием проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ). Летом 2013 г. в составе научной экспедиции, организованной ООО «АржаанЛаб» (г. Кызыл), на Чойгане проводились комплексные научные исследования подземных вод, в процессе которых было обследовано 33 родника [11].

В 130 км к юго-западу от Чойгана по тому же глубинному разлому на крайнем юго-востоке республики Тыва рядом на границе с Монголией находится действующий лечебный курорт Уш-Белдир, который представляет собой крупное месторождение азотных терм. Источники располагаются в Прихубсугульском нагорье на абсолютной высоте 1120 м в месте слияния трех рек: Шишхид-Гол, Белин и Бусин-Гол. Месторождение насчитывает 10 термальных источников с температурой от 37 до 80 °С, а также в 50-х гг. XX в. было пробурено 4 разведочно-эксплуатационных и 9 зондировочных скважин. В 1932 г. В.М. Левченко проводил изучение термальных вод Уш-Белдира, после чего через год здесь открыли небольшой курорт. Последующее изучение источников проводилось геологами, гидрогеологами и бальнеологами (С.В. Обручев, В.В. Архангельская, Г.В. Махин, К.Ф. Богородицкий и др.) в 1945–1955 гг.

В 1963–1966 гг. был произведен подсчет запасов термальных вод Центральным институтом курортологии и физиотерапии, результаты этих работ освещены в работах Л.Н. Барабанова и В.Е. Сидорова (1967 г.) [13].

Геологическая структура представляет собой громадные глыбовые блоки, разбитые системой региональных разломов меридионального и широтного направлений. Главный Бусино-Белинский разлом протягивается близком к меридиональному направлению вдоль рек Бусин-Гола и Белина. Породы представлены метаморфическими толщами верхнего протерозоя (гнейсы, кварциты, сланцы) и синия (мраморы, сланцы), а также прорывающими их нижнепалеозойскими (габбро, диориты, габбро-диориты) и девонскими (граниты, сиениты) интрузиями. Здесь располагается обширное Восточно-Тувинское поле кайназойских базальтов [13].

Еще одна большая группа родников расположена в высокогорной местности на юго-востоке Республики Тыва, вблизи границы с Монголией – природный комплекс Тарыс, представляющий собой выходы 30 холодных и термальных родников. Источники находятся в 125 км южнее курорта Уш-Белдир в отрогах Прихубсугульского нагорья в устье ручья Аржаанец, на абсолютной отметке 1940 м, и представляют собой провинцию азотных вод с температурой воды до 48 °С. Наличие крупного разлома субмеридионального простирания вдоль контакта мраморизованных известняков верхнего протерозоя и нижнепалеозойских гранитов, а также трещиноватость пород обусловили возникновение термальных источников [14]. Первые сведения о Тарысских горячих источниках появились в работе В.М. Левченко в 1935 г., а в 1949 г. они изучались бальнеологом С.Л. Рогачевским. Изучением

режима минеральных вод и строительством ванн на Тарысе в 1954–1955 гг. занимались сотрудники «Союзгеокаптажминвод» (К.Ф. Богородицкий, В.И. Валединский, 1957). Летом 1955 г. Тувинским облздравотделом на Тарысе был организован временный врачебный пункт и консультации бальнеологов [13]. В 1965 г. термы обследовались Е.В. Пиннекером и Ю.И. Кустовым. Современное исследование родников Тарыса проводилось в 2012 г. под руководством Ч.К. Ойдул, а в 2013 г. работы по изучению вод велись К.Д. Аракчаа.

Методы исследования

Отбор проб природных вод проводился во время полевых маршрутов в 2013–2015 гг. В процессе полевых исследований на месте отбора проб определялись неустойчивые параметры состава вод: температура, pH, Eh, удельная электрическая проводимость с использованием портативного мультипараметрового анализатора Water Test фирмы Hanna. Вода для анализа макрокомпонентного состава отбиралась в пластиковую посуду объемом 1 л и доставлялась в лабораторию для анализа. Ионная составляющая химического состава вод анализировалась методами турбидиметрии, титриметрии, колориметрии и ионной хроматографии. Анализ проводился по программе общего количественного анализа. Комплексный анализ вещества состава вод выполнены в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Института природных ресурсов Томского политехнического университета. В работе использовались результаты анализа химического состава термальных родников Чойгана, Уш-Белдира и Тарыса, имеющих температуру при разгрузке более 20 °С.

Название вод давалось в соответствии с правилом оттенков, согласно которому название химического типа воды складывается отдельно из ведущих анионов и катионов, содержания которых превышают 25 %-экв. При этом на первое место в названии ставятся анионы от 25 %-экв в возрастающем порядке, затем катионы в таком же порядке.

Для оценки резервуарных температур использованы различные методы, такие как геохимические геотермометры, диаграмма Гиггенбаха (W.F. Giggenbach, 1988) и метод минеральных равновесий. На основе результатов химического анализа проб воды были рассчитаны глубинные температуры с помощью геохимических геотермометров. Для расчетов были использованы Na-K геотермометр (R.O. Fournier, 1979), кремниевый (R.O. Fournier и R.W. Potter, 1982), K-Mg (Giggenbach, 1988) и Na-K-Ca (Fournier and A.H. Truesdell, 1973) геотермометры [8, 15, 16].

Na-K геотермометр (Fournier, 1979):

$$T = \frac{1217}{1,438 + \log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)} - 273,15,$$

где Na, K в мг/л.

Кремниевый геотермометр (Fournier и Potter, 1982):

$$T = -42,198 \times (\pm 1,345) + 0,28831 \times (\pm 0,01337) \times S - 3,6686 \times 10^{-4},$$

где S – концентрация SiO₂ в мг/л.

K-Mg (Giggenbach, 1988):

$$T = \frac{4410}{14 - \log \frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}} - 273,15,$$

где K, Mg в мг/л.

Na-K-Ca геотермометр (Fournier и Truesdell, 1973):

$$T = \frac{1647}{\lg\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \beta \lg\left(\frac{\text{Ca}^{0,5}}{\text{Na}}\right)} - 273,15,$$

Na, K, Ca – в моль/л, $\beta=4/3$ для $T < 100$ °С.

Применение геотермометров основано на зависимости концентраций растворенных веществ от температуры и построено на предположении о сохранении равновесия в системе вода–порода–газ в геотермальном резервуаре до разгрузки вод на поверхности земли [17]. Катионные геотермометры основаны на реакциях ионного обмена, характеризующихся температурно-зависимыми константами равновесия [18].

Na-K геотермометр, представленный разными авторами, основан на обмене ионов K⁺ и Na⁺ в пластовых условиях и отражает возможные максимальные температуры в глубоких геотермальных системах. Он содержит дополнительные данные о более глубоких условиях и тепловых характеристиках геотермальной жидкости. Na-K геотермометр хорошо подходит для оценки температуры воды выше 200 °С [16, 18].

Кремниевый геотермометр основан на экспериментально определенных изменениях растворимости различных видов кремнезема (кварца, аморфного кремнезема и халцедона) в резервуаре в зависимости от температуры и давления. Кварцевые геотермометры лучше всего подходят для воды в диапазоне температур ниже 120–250 °С [18]. Недостаток данного геотермометра в том, что в связи с разбавлением термальных вод холодной водой, со сравнительно низким содержанием кремнезема, происходит его потеря, следовательно, расчетная температура пласта будет заниженной [16].

K-Mg геотермометр был впервые предложен Giggenbach и другими в 1983 г., а затем Giggenbach в 1988 г. разработал уравнение для этого геотермометра. Геотермометр используется для гидрогеотермальных систем с низкой и средней температурой в резервуаре порядка 50–300 °С. В отличие от Na-K геотермометра, K-Mg геотермометр отличается быстрым влиянием на изменения температуры и отражает самые последние значения температуры геотермальной жидкости [16].

Na-K-Ca геотермометр был разработан Fournier и Truesdell в 1973 г. для применения в водах с повышенным содержанием Ca^{2+} , который дает аномально высокую расчетную температуру для Na-K геотермометра. Геотермометр полностью эмпирический и предполагает один тип реакции обмена при температурах примерно 100 °C [18].

По температуре формирования вод и геотермическому градиенту региона определялась глубина формирования вод по формуле:

$$h_{\text{форм}} = \frac{T}{\gamma},$$

где γ – геотермический градиент [5]. С учетом уровня теплового потока в регионе, а также средней теплопроводности метаморфических и магматических пород в горных районах южной Сибири (2,5 Вт/м °C) для Уш-Белдира и Тарыса геотермический градиент составляет 27,2 °C/км, а для Чойгана – 33,6 °C/км [5].

Кроме того, в программном комплексе PhreeqC были рассчитаны индексы насыщения вод (SI) различными минералами при разных температурах. Физико-химическое моделирование выполнялось для условий нормального атмосферного давления, диапазон температур был выбран от температуры разгрузки растворов до 150–200 °C. Если значения индексов насыщения относительно нескольких минералов находятся около нуля, т. е. в равновесном состоянии при определенной температуре, эта температура соответствует наиболее вероятной пластовой температуре для конкретной рассматриваемой воды [19]. Если SI равен или близок к нулю, то раствор находится в равновесном состоянии с данным минералом, при SI < 0 – раствор ненасыщен к минералу (происходит его растворение), если значение SI > 0 – раствор перенасыщен к минералу и происходит его формирование [20]. В связи с тем, что геотермальные жидкости обычно подвергаются смешиванию с другими водами, будет наблюдаться сдвиг в значениях индекса насыщения, при котором раствор находится в равновесии с минералами, т. е. SI будет от 0 до ±0,5 [21].

Выбор минералов для построения графиков зависимости индексов насыщения от температуры основывался на определенном типе вод и характерных для этих типов минеральных равновесий в гидротермальных системах. Так как не известно, какие минералы на самом деле существуют в данной геотермальной системе, то вычисления выполняются для наиболее распространенных минералов, которые, как предполагается, существуют в системе и будут находиться в равновесии, в то время как равновесия с другими минералами не будут наблюдаться.

Обсуждение результатов

В табл. 1 приведен макрокомпонентный состав термальных вод Чойгана, Уш-Белдира и Тарыса.

По основным физико-химическим свойствам углекислые подземные воды Чойгана являются

термальными с температурой от 20 до 39 °C, слабокислыми и околонеutralными (pH 6,1–6,9), значения окислительно-восстановительного потенциала составляют от –170 до 183 мВ, в катионном составе преобладают ионы кальция и натрия, анионный состав представлен преимущественно гидрокарбонат-ионом. Отличительной чертой углекислых вод Чойгана, относительно других изучаемых вод Восточной Тувы, является кислый характер среды, наличие растворенного CO_2 (277–1252 мг/л) и повышенное содержание основных макрокомпонентов, а также SiO_2 в диапазоне от 26 до 55 мг/л. Воды Чойгана являются наиболее солеными, минерализация в среднем составляет 2216 мг/л. Минерализация вод обусловлена выщелачиванием элементов, таких как Ca, Na, K и Mg, из вмещающих пород поступающим углекислым газом.

Таблица 1. Химический состав термальных вод Восточной Тувы, мг/л

Table 1. Chemical composition of thermal water of Eastern Tuva, mg/l

Компонент Component		Чойган Choygan	Уш-Белдир Ush-Beldir	Тарыс Tarys
T	°C	<u>20–39</u> 28	<u>28–83</u> 62	<u>20–48</u> 37
pH	–	<u>6,1–6,9</u> 6,4	<u>9,5–9,8</u> 9,7	<u>8,6–9,7</u> 9,5
Eh	mВ (mV)	<u>–170–183</u> 29,8	<u>–482–120</u> –280	<u>–334– –39</u> –292
HCO ₃ [–]	мг/л (mg/l)	<u>1085–1910</u> 1607	<u>91–113</u> 105	<u>51–128</u> 69
SO ₄ ^{2–}		<u>4,5–45,2</u> 15,1	<u>26–53</u> 34	<u>114–220</u> 192
Cl [–]		<u>14,1–32,5</u> 23,5	<u>19–23</u> 21	<u>14–19</u> 15
Ca ²⁺		<u>156–288</u> 225	<u>1–3</u> 2	<u>0,15–1,0</u> 0,34
Mg ²⁺		<u>24,1–45,1</u> 32,1	<u>0,4–0,6</u> 0,5	<u>0,1–2,4</u> 0,8
Na ⁺		<u>163–358</u> 283	<u>104–114</u> 110	<u>121–162</u> 148
K ⁺		<u>24,2–56,2</u> 43,1	<u>2,8–3,6</u> 3,2	<u>4,1–6,7</u> 4,5
SiO ₂		<u>25,6–54,7</u> 44	<u>92,1–128,6</u> 116,2	<u>36,5–90,9</u> 71,6
F		<u>0,14–1,1</u> 0,46	<u>12–14</u> 13	<u>15–24</u> 22
CO ₂ ^{2–}		<u>277–1252</u> 706	–	–
CO ₃		–	<u>66–90</u> 81	<u>8,4–43</u> 30
Минерализация TDS			<u>1545–2647</u> 2216	<u>352–377</u> 369
Количество родников Number of springs		20	9	19
Химический тип Chemical type		HCO ₃ -Ca-Na	HCO ₃ -Na	SO ₄ -Na

Примечание. В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Note: minimum and maximum values are in the numerator, the average ones are in the denominator.

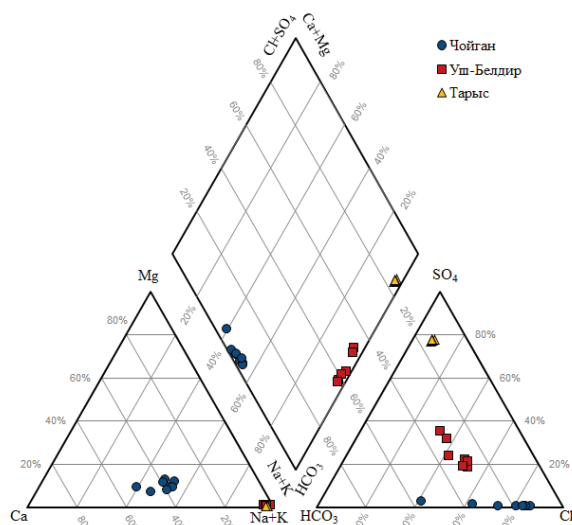


Рис. 2. Диаграмма Пайпера с нанесением данных по химическому составу термальных вод Восточной Тувы

Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of the thermal waters of Eastern Tuva

Азотные термальные воды Уш-Белдира и Тарыса по химическому составу, минерализации, температуре, значениям pH и Eh существенно отличаются от вод Чойгана. Подземные воды Уш-Белдира относятся к содовому типу, имеют высокую температуру воды в скважине (83 °C) и сильно восстановительную среду (минимальное значение Eh составляет –482 мВ), отличаются повышенной щелочностью (pH 9,5–9,7). В химическом составе воды среди катионов преобладает Na^+ , в анионном составе – HCO_3^- . Воды умеренно пресные, с низким содержанием основных макрокомпонентов и, соответственно, низкой минерализацией – 374 мг/л, кроме того подземные воды Уш-Белдира отличаются высокими содержаниями SiO_2 (92–129 мг/л) и F^- (12–14 мг/л).

Максимальная температура воды Тарыса составляет 48 °C. По составу термальная вода является пресной сульфатной натриевой, минерализация в среднем составляет 483 мг/л, характеризуется низким окислительно-восстановительным потенциалом (Eh –292 мВ), по pH воды щелочные (pH 8,6–9,7). Отличительной чертой подземных вод Тарыса является присутствие в высоких концентрациях SO_4^{2-} (114–220 мг/л), F^- (15–24 мг/л) и SiO_2 (37–91 мг/л). Источниками F^- , как и SiO_2 , являются алюмосиликаты, и чем более длительным является взаимодействие в системе вода–порода, тем больше F может быть аккумулировано в водном растворе.

Для геотермической оценки и выбора подходящего геотермометра для каждого типа вод широко используется диаграмма Na-K-Mg (рис. 3), предложенная Гиггенбахом в 1988 г. Эта диаграмма используется для установления степени равновесия подземных вод с минералами вмещающих пород и отражает эффект смешивания вод [17, 22].

Диаграмма также применяется для прогнозирования равновесной температуры и возможности использования катионных геохимических геотермометров для термальных вод. Она основана на температурной зависимости равновесия вод с группой минералов калия и натрия, которые образуются после изохимического метаморфизма породы в условиях геотермального влияния [23]. Положение точек опробования на диаграмме в поле «полного равновесия» (рис. 3) означает насыщение вод вторичными минералами натрия. Положение точек ниже линии равновесия в области «частичного равновесия» или «смешанных вод» отражает растворение минералов, но при этом вода не достигает полного насыщения вторичными минералами, либо указывает на смешение термальных вод с холодными грунтовыми водами. Область так называемых «неравновесных вод» указывает на начальную стадию растворения минералов, т. е. отсутствие равновесия вод с минералами калия и магния, высокое содержание магния в воде также объясняет расположение точек в данном поле [18].

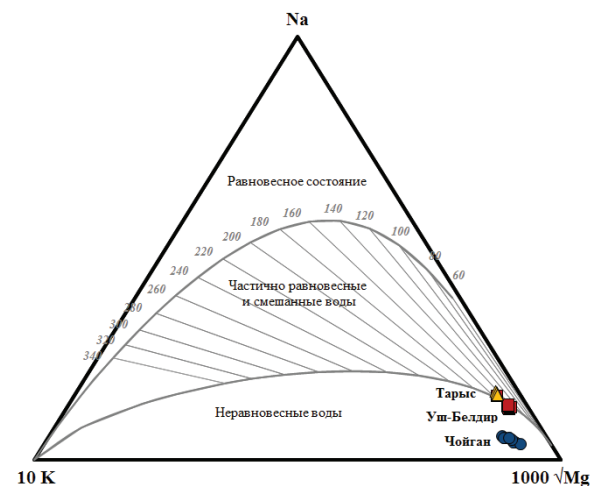


Рис. 3. Na-K-Mg треугольная диаграмма (Giggenbach, 1988) с нанесением термальных вод Восточной Тувы, демонстрирующая условия химического равновесия

Fig. 3. Na-K-Mg triangular diagram (Giggenbach, 1988) for thermal water of Eastern Tuva showing equilibrium conditions

Для определения применимости катионных геотермометров для изучаемых типов термальных вод Восточной Тувы результаты химического анализа точек опробования были нанесены на диаграмму Гиггенбаха. Подземные воды Чойгана на диаграмме лежат в поле неравновесного состояния вод, близко к углу $\text{Mg}^{1/2}$ (рис. 3). Отсутствие равновесия вод с вторичными минералами калия и натрия возможно из-за быстрой циркуляции вод в трещинных водоносных породах и повышенного содержания Mg^{2+} в водах Чойгана (21–45 мг/л), по сравнению с другими рассматриваемыми водами. Нельзя не отметить тот факт, что присутствие свободной углекислоты в высоких концентрациях

ускоряет процесс выщелачивания элементов из вмещающих пород, обогащая воды такими катионами, как Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , что также влияет на результаты оценки. В связи с этим для данного типа вод использование катионных геотермометров не дает надежную оценку равновесной температуры, вместо этого более подходящими для использования будут кремниевые геотермометры.

На рис. 3 термы Тарыса и Уш-Белдира лежат в поле частично равновесных и смешанных вод с приблизительной температурой пласта 140–120 °С, что отражает более высокую стадию взаимодействия подземных вод с минералами и позволяет с помощью катионных геотермометров установить для данных типов вод надежные температуры пласта. Результаты расчетов глубинных температур с помощью геотермометров представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные глубинные температуры подземных вод Восточной Тувы

Table 2. Calculated reservoir temperatures of the groundwater of Eastern Tuva

Геотермометр Geothermometer	Температура пласта Reservoir temperature (°C)		
	Чойган Choygan	Тарыс Tarys	Уш-Белдир Ush-Beldir
Na-K (Fournier, 1979)	250–270 238	120–147 132	131–141 138
SiO_2 (Fournier и Potter, 1982)	74–106 96	102–129 117	133–149 141
K-Mg (Giggenbach, 1988)	76–93 87	66–102 80	71–80 74
Na-K-Ca (Fournier и Truesdell, 1973)	82–119 105	118–131 125	96–141 120

Результаты геотермометрии показали, что температура формирования подземных вод Чойгана, рассчитанная по Na-K геотермометру, получилась сильно завышенной (более 200 °С), вызывая сомнения в использовании Na-K геотермометра для данного типа вод. Это связано с высокими содержаниями Ca^{2+} , а также с сильным влиянием смешения термальных и холодных грунтовых вод [15]. Кремниевый, K-Mg и Na-K-Ca геотермометры показали более реальную температуру для гидрокарбонатных кальциевых вод Чойгана – 96, 87 и 105 °С соответственно.

В более горячих и маломинерализованных водах Тарыса и Уш-Белдира значения глубинных температур оказались близкими между собой. Заниженную температуру формирования подземных вод Тарыса и Уш-Белдира показал K-Mg геотермометр – 80 и 74 °С соответственно, такие результаты связаны с низкими концентрациями K^+ и Mg^{2+} в сульфатных и содовых водах, где преобладающим катионом является Na^+ , следовательно, применение данного геотермометра для оценки температуры нецелесообразно. Расчеты глубинных температур вод с помощью Na-K, кремниевого и Na-K-Ca геотермометров показали значения выше 100 °С, разница между показаниями геотермометров со-

ставила не более 20 °С, что допустимо при оценке. Для Тарыса глубинная температура циркуляции вод составляет в среднем 122 °С, для Уш-Белдира – 130 °С. Согласно полученным результатам, практически все геотермометры дают достаточно точную оценку глубинной температуры для термальных сульфатных и содовых вод.

Установленные по результатам геотермометрии высокие температуры циркуляции вод для Восточной Тувы связаны с повышенным тепловым потоком на территории Тувы, при этом геотермические градиенты составляют чуть выше среднего для верхней части земной коры [3]. С учетом температуры, полученной по кремниевому геотермометру и геотермическому градиенту на Чойгане (33,6 °С/км) [3], глубина формирования составляет около 3 км. К юго-западу от Чойгана на Тарысе и Уш-Белдире геотермический градиент уменьшается и составляет 27,2 °С/км, при этом значения глубинных температур возрастают на 20–30 °С, а глубина циркуляции располагается на 1–2 км ниже, т. е. на уровне 4,5 и 4,8 км соответственно.

Кроме геотермометрической оценки существует еще один способ для установления глубинных температур или для проверки результатов расчетов геотермометров. Химический состав термальных вод определяется температурно-зависимыми реакциями между вмещающей породой и термальной водой, а также зависит от нескольких факторов: минерального состава пород-коллекторов, процессов смешивания, кипения и охлаждения [7]. М.Н. Reed и N. Spycher (1984) предложили для наилучшей оценки температуры пласта использовать состояние равновесия между водой и различными минералами в зависимости от температуры, т. к. константы равновесий сильно зависят от температурных условий [19, 24]. Этот метод был применен к выборочным родникам Чойгана, Тарыса и Уш-Белдира, имеющим максимальную температуру воды на выходе (рис. 4).

Согласно расчетам при различных температурах, углекислые подземные воды Чойгана находятся в равновесии с кальцитом, кварцем, халцедоном, насыщены доломитом, мусковитом и каолинитом и далеки от равновесия с ангидритом при температуре разгрузки 38 °С (рис. 4, а). Для установления глубинной температуры вод необходимо определить температуру, при которой наибольшее число минералов находится в равновесии с водой, т. е. $SI=0$. Для этого на графике была найдена точка пересечения линий индексов насыщения нескольких минералов (мусковита, каолинита, кварца и халцедона), расположенная около нуля на уровне 95 °С, что отражает температуру формирования термальных вод Чойгана.

Оценка температуры формирования вод по расчетам индексов насыщения для высокотемпературных вод Тарыса и Уш-Белдира показала более высокие температуры, чем для гидротерм Чойгана. Сульфатные воды месторождения Тарыс при температуре разгрузки 48 °С насыщены кремне-

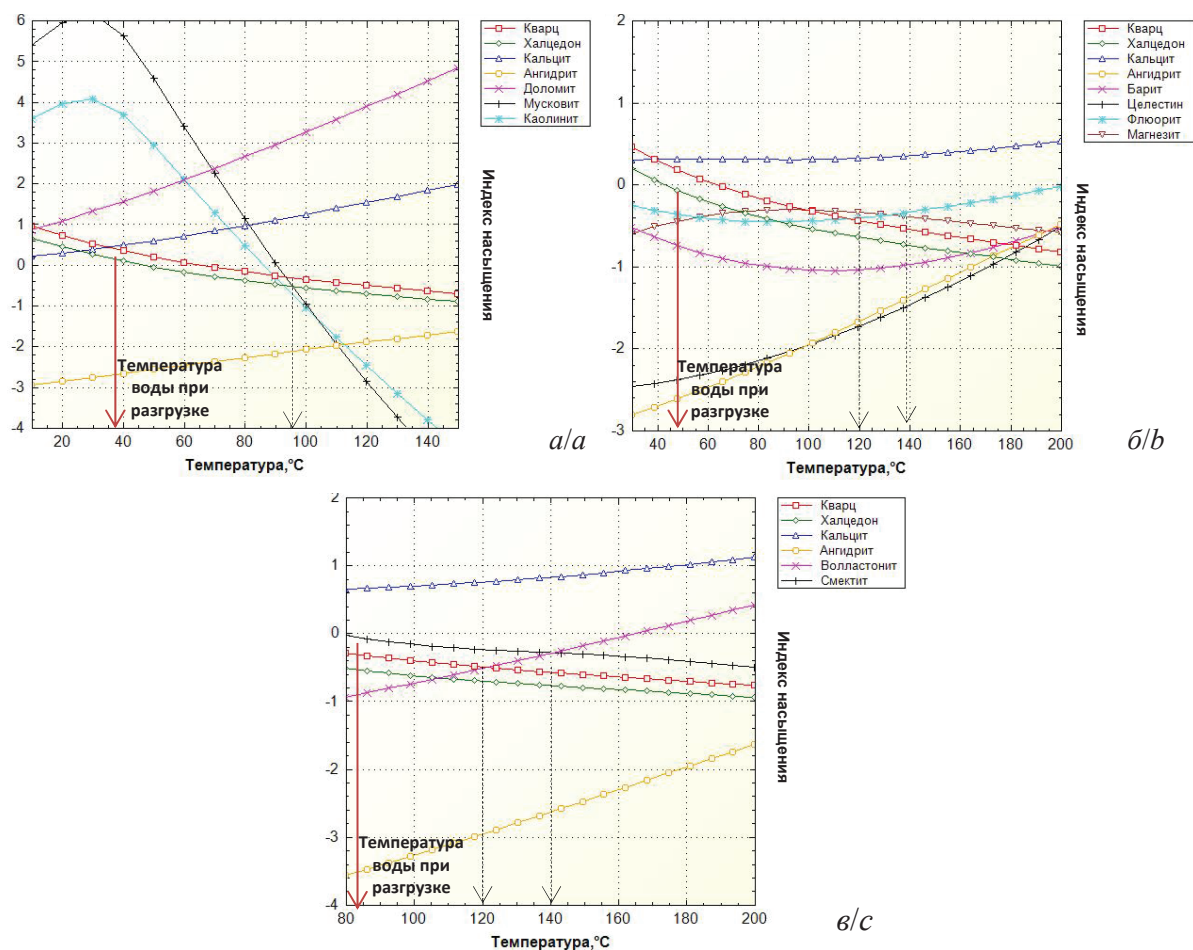


Рис. 4. Диаграммы равновесий минералов для термальных вод Восточной Тувы: а) Чойган, родник № 12; б) Тарыс, родник № 12; в) Уш-Белдир, скважина № 1 рэ

Fig. 4. Mineral equilibrium diagrams for thermal waters of Eastern Tuva: a) Choygan, spring no. 12; b) Tarys, spring no. 12; c) Ush-Beldir, well no. 1 re

выми и карбонатными минералами (халцедон, кварц и кальцит), при этом неравновесны с сульфатными минералами (барит, целестин, ангидрит), магнетитом и флюоритом (рис. 4, б). Область пересечения индексов насыщения флюорита, магнетита, кварца и халцедона находится в пределах температур 120–140 °C.

При температуре на выходе 83 °C наблюдается насыщение гидрокарбонатных натриевых вод Уш-Белдира кальцитом и низкотемпературным смектитом (рис. 4, в). Линия индексов насыщения смектитом, волластонитом, кварцем и халцедоном пересекаются в области температур 120–140 °C. Для более точного определения температуры можно использовать расчеты индексов насыщения другими минералами.

Полученные с помощью индексов насыщения температуры пласта близки к температурам, рассчитанным по геотермометрам, однако не дают точных значений. Этот метод можно использовать предварительно для ориентировочной оценки глубинной температуры или в качестве проверки расчетных температур геотермометров.

Выводы

Благодаря использованию нескольких существующих методов оценки глубинной температуры вод были рассчитаны пластовые температуры гидротермальных систем Восточной Тувы, а также для каждого типа вод установлены подходящие геотермометры.

Для сульфатных и содовых вод Тарыса и Уш-Белдира хорошую сходимость результатов показало применение практически всех геотермометров, разница температур составляет не более 20 °C. Полученные прогнозные температуры пласта по расчетам геотермометров составляют 120 °C на глубине 4,5 км для Тарыса и 130 °C на глубине 4,8 км для Уш-Белдира. Метод расчетов индекса насыщения в зависимости от температуры также дал хорошие результаты оценки глубинных температур. Для Уш-Белдира и Тарыса диапазон температур находится в пределах 120–140 °C, что совпадает с расчетами геотермометров. Расчеты К-Mg геотермометра показали заниженные температуры для сульфатных и гидрокарбонатных натриевых гидротерм Тарыса и Уш-Белдира, что дает возмож-

ность усомниться в его применимости для этих типов вод.

В случае с гидрокарбонатными кальциевыми водами Чойгана определение достоверных глубинных температур с помощью катионных геотермометров, особенно по Na-K геотермометру, является затруднительным. В этом случае для так называемых неравновесных вод, согласно диаграмме Гиггенбаха, более надежную оценку температуры пласта обеспечивают K-Mg и Na-K-Ca геотермометры, а также кремниевый. Величина глубинной температуры на Чойгане, полученная по геотермометрам, составила около 100 °C и подтвердилась другим методом определения температуры с помощью расчетов индексов насыщения, при этом глубина формирования оценивается в 3 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia / H. Baioumy, M. Nawawi, K. Wagner, M.H. Ariffin // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2015. – V. 290. – P. 12–22.
2. Potential Geothermal Energy Resources of India: a review / H.K. Singh, D. Chandrasekharam, G. Trupti, P. Mohite, B. Singh // *Curr. Sustain. Energy Reports*. – 2016. DOI: 10.1007/s40518-016-0054-0.
3. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках / А.Д. Дучков, К.М. Рычкова, В.И. Лебедев, И.Л. Каменский, Л.С. Соколова // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51. – № 2. – С. 264–276.
4. Поляк Б.Г. Изотопы гелия в подземных флюидах Байкальского рифта и его обрамления (к геодинамике континентального рифтогенеза) // *Российский журнал наук о Земле*. – 2000. – Т. 2. – № 2. – С. 1–21.
5. Окская гидротермальная система (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.В. Иванов, Б.И. Писарский, А.И. Оргильянов // *Вулканология и сейсмология*. – 2013. – № 4. – С. 27–39.
6. Estimation of deepwater temperature and hydrogeochemistry of springs in the Takab geothermal field, West Azerbaijan, Iran / R. Sharifi, F. Moore, Z. Mohammadi, B. Keshavarzi // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2016. – V. 188. – P. 75–86.
7. Solute geothermometry of Cerro Prieto and Los Hornos geothermal fields, Mexico: considerations on chemical characteristics of thermal water / A.Y. García-Soto, K. Pandarinath, J.E. Marrero-Ochoa, C. Diaz-Gimenez // *Arab. J. Geosci.* – 2016. DOI: 10.1007/s12517-016-2529-0
8. Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields // *Geothermics*. – 2008. – V. 37. – № 6. – P. 597–621.
9. Pandarinath K., Domínguez-Domínguez H. Evaluation of the solute geothermometry of thermal springs and drilled wells of La Primavera (Cerritos Colorados) geothermal field, Mexico: a geochemometrics approach // *South Am. Earth Sci.* – 2015. – V. 62. – P. 109–124.
10. Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров / П.С. Бадминов, Д. Ганчимэг, А.И. Оргильянов, И.Г. Крюкова, Д. Оюундэцэг // *Вестник БГУ. Химия, физика*. – 2011. – Вып. 3. – С. 90–94.
11. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа, А.А. Хвашевская // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55. – № 11. – С. 1635–1648.
12. Кужугет К.С., Монгуш С.С., Рычкова К.М. Глубинные температуры, кайнозойский вулканизм и сейсмичность Восточной Тувы // *Молодёжный научный вестник*. – 2016. – № 9. – С. 100–105.
13. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. – Кызыл: Тувинское книжное изд-во, 1968. – 105 с.
14. Химический состав вод родников природного комплекса Тарыс (Восточная Тува) / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа и др. // *Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов*. – 2015. – Т. 2. – № 1–1. – С. 89–98.
15. Alçiçek H., Bülbül A., Alçiçek M.C. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Yenice Geothermal Field (Denizli Basin, Southwestern Anatolia, Turkey) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 2016. – V. 309. – P. 118–138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.025.
16. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data / T. Uzelli, A. Baba, G.G. Mungan et al. // *Geothermics*. – 2017. – V. 68. – P. 67–85.
17. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in north-central Algeria / M. Belhai, Y. Fujimitsu, F.Z. Bouchareb-Haouchine, A. Haouchine, J. Nishijima // *Acta Geochim.* – 2016. – V. 35. – P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
18. Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // *Geothermal training programme*. – 2009. – V. 10. – P. 125–150.
19. Gökçöz A., Akdağoglu H. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a coastal low-temperature geothermal field: a case study from the Datça Peninsula (SW Turkey) // *Environ. Earth Sci.* – 2016. – V. 75. – P. 1143–1161.
20. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: Т. 1: Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
21. Wishart D.N. Comparison of silica and cation geothermometers of bath hot springs, Jamaica // *WI World Geotherm. Congr.* – Melbourne, 2015. – P. 1–13.
22. Integrated study of surface and subsurface data for prospecting hydrogeothermal basins of hot water spring Ain El Hammam: case of Utique region basin (extreme north of Tunisia) / M. Andolssi, S. Alyahyaoui, J. Makni, A. Charef, H. Zouari, M. Tarki, B. Challouf // *Arab. J. Geosci.* – 2015. – V. 8. – P. 8879–8897. DOI: 10.1007/s12517-014-1743-x
23. Gignenbach W.F. Geochemical exploration of a «difficult» geothermal system, Paraso, Vella Lavella, Solomon Islands // *Proc.*

- of the World Geothermal Congress. – Florence, Italy, 1995. – P. 995–1000.
24. Reed M.H., Spycher N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1984. – V. 48 – P. 1479–1492.
25. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China / P. Yang, Q. Cheng, S. Xie, J. Wang et al. // *Journal of Hydrology.* – 2017. – № 549. – P. 50–61.

Поступила 26.09.2017 г.

Информация об авторах

Шестакова А.В., инженер проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гусева Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314

CALCULATION OF DEEP TEMPERATURES OF THERMAL WATERS IN EASTERN TUVA

Anastasia V. Shestakova¹,

ashest91@mail.ru

Natalia V. Guseva¹,

guseva24@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, 634050, Lenin Avenue, Tomsk, Russia.

Relevance of the work is caused by the presence of a wide variety of geochemical geothermometers used to assess depth of temperatures, and reliability of their application to various chemical types of thermal waters.

The main aim of the study is to establish the applicability of the method for estimating deep temperatures of thermal waters circulation using geothermometers for different chemical types on the example of the Eastern Tuva springs.

Methods of research. Chemical composition analysis of the waters was carried out in the accredited research laboratory of hydrogeochemistry of TPU. Traditional methods were used to conduct a complete chemical analysis. Geochemical geothermometers and calculation of a mineral saturation index as a function of temperature in PhreeqC package were used to estimate the deep temperatures.

Results. The assessment of the temperature conditions of the Eastern Tuva hydrothermal systems shown silicon geothermometers predicted more reliable reservoir temperatures for all thermal waters in question compared to other geothermometers independently of chemical types of water. The choice of this or that geothermometer is determined by the chemical type of water, equilibrium in the water–rock system and concentration of the main elements. Almost all geothermometers showed good convergence of results for sulfate and hydrocarbonate waters of Tarys and Ush-Beldir, the predicted reservoir temperatures are 120 and 130 °C at a depth of 4,5 and 4,8 km, respectively. The same temperature values were obtained by the saturation index approach over a range of temperatures. Determination of reliable deep temperatures for the Choigan hydrocarbonate waters with help of cationic geothermometers proved to be difficult. In this case, the silicon geothermometer provides a reliable estimate of the reservoir temperature for waters with high cation concentrations. The value of the temperature obtained from the silicon geothermometer was confirmed by another method of temperature determining – using saturation indices – and it is about 100 °C, while the depth of formation is estimated at 3 km.

Key words:

Thermal waters, geothermometers, hydrothermal system, chemical composition, Tuva.

The authors appreciate the valuable comments of the professor Stepan L. Shvartsev.

The research was financially supported by the RFBR grant no. № 16–35–00324 мол_a.

REFERENCES

1. Baoumy H., Nawawi M., Wagner K., Arifin M.H. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 290, pp. 12–22.
2. Singh H.K., Chandrasekharam D., Trupti G., Mohite P., Singh B. Potential Geothermal Energy Resources of India: a review. *Curr. Sustain. Energy Reports*. DOI 10.1007/s40518-016-0054-0.
3. Duchkov A.D., Rychkova K.M., Lebedev V.I., Kamenskiy I.L., Sokolova L.S. Estimates of the heat flow of Tuva by the data on helium isotopes in thermomineral sources. *Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 2, pp. 264–276. In Rus.
4. Polyak B.G. Helium isotopes in underground fluids of Baikal rift and its margins (on geodynamics of continental rifting). *Rossiyskiy zhurnal nauk o Zemle*, 2000, vol. 2, no. 2, pp. 1–21. In Rus.
5. Badminov P.S., Ivanov A.V., Pisarskiy B.I., Orgiliynov A.I. Okinsk hydrothermal system (Eastern Sayan). *Journal of Volcanology and Seismology*, 2013, no. 4, pp. 27–39. In Rus.
6. Sharifi R., Moore F., Mohammadi Z., Keshavarzi B. Estimation of deepwater temperature and hydrogeochemistry of springs in the Takab geothermal field, West Azerbaijan, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, pp. 75–86.
7. García-Soto A.Y., Pandarinath K., Marrero-Ochoa J.E., Díaz-Gómez C. Solute geothermometry of Cerro Prieto and Los Hornos geothermal fields, Mexico: considerations on chemical characteristics of thermal water. *Arab. J. Geosci.*, 2016. DOI: 10.1007/s12517-016-2529-0
8. Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields. *Geothermics*, 2008, vol. 37, no. 6, pp. 597–621.
9. Pandarinath K., Domínguez-Domínguez H. Evaluation of the solute geothermometry of thermal springs and drilled wells of La Primavera (Cerritos Colorados) geothermal field, Mexico: a geochemometrics approach. *South Am. Earth Sci.*, 2015, vol. 62, pp. 109–124.
10. Badminov P.S., Ganchimeg D., Orgiliynov A.I., Krukova I.G., Oyuntsetseg D. Evaluation of deep temperatures of thermal springs in Khangay and East Sayan using hydrochemical geothermometers. *Vestnik Buryatskogo gosydarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 90–94. In Rus.
11. Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D., Khvashchevskaya A.A. Geochemistry of CO₂ waters of the natural spa complex Choygan (north-east of Tuva). *Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 11, pp. 1635–1648. In Rus.
12. Kuzheget K.S., Mongush S.S.S., Ruchkova K.M. Glubinnye temperatury, kaynozoysskiy vulkanizm i seysmichnost Vostochnoy Tuvy [Deep temperatures, Cenozoic volcanism and seismicity of Eastern Tuva]. *Molodezhniy nauchniy vestnik*, 2016, no. 9, pp. 100–105.
13. Pinneker E.V. *Mineralnye vody Tuvy* [Mineral water of Tuva]. Kyzyl, Tuvan Publ., 1968. 105 p. In Rus.
14. Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D. Chemical composition of the springs of the natural complex Tarys (Eastern Tuva).

- The resort base and natural health-improving areas of Tuva and adjacent regions*, 2015, vol. 2, no. 1–1, pp. 89–98. In Rus.
15. Alçiçek H., Bülbül A., Alçiçek M.C. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Yenice Geothermal Field (Denizli Basin, Southwestern Anatolia, Turkey). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2016, vol. 309, pp. 118–138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.025.
 16. Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data. *Geothermics*, 2017, vol. 68, pp. 67–85.
 17. Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb-Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in north-central Algeria. *Acta Geochim.*, 2016, vol. 35, pp. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
 18. Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia. *Geothermal training programme*, 2009, vol. 10, pp. 125–150.
 19. Gökgöz A., Akdagoglu H. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a coastal low-temperature geothermal field: a case study from the Datça Peninsula (SW Turkey). *Environ. Earth Sci.*, 2016, vol. 75, pp. 1143–1161.
 20. Alekseev V.A., Ryzhenko B.N., Shvartsev S.L. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystviye, kinetika, ravnovesiye, modelirovaniye* [Geological evolution and formation of water–rock system. V. 1. The water–rock system in the crust: interaction, kinetics, equilibrium modeling]. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 244 p.
 21. Wishart D.N. Comparison of Silica and Cation Geothermometers of Bath Hot Springs, Jamaica WI. *World Geotherm. Congr. Melbourne*, 2015. pp. 1–13.
 22. Andolssi M., Alyahyaoui S., Makni J., Charef A., Zouari H., Tarki M., Challouf B. Integrated study of surface and subsurface data for prospecting hydrogeothermal basins of hot water spring Ain El Hammam: case of Utique region basin (extreme north of Tunisia). *Arab. J. Geosci.*, 2015, vol. 8, pp. 8879–8897. DOI: 10.1007/s12517-014-1743-x
 23. Giggenbach W.F. Geochemical exploration of a «difficult» geothermal system, Paraso, Vella Lavella, Solomon Islands. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Florence, Italy, 1995. pp. 995–1000.
 24. Reed M.H., Spycher N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, vol. 48, pp. 1479–1492.
 25. Yang P., Cheng Q., Xie S., Wang J. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China. *Journal of Hydrology*, 2017, no. 549, pp. 50–61.

Received: 26 September 2017.

Information about the authors

Anastasia V. Shestakova, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Guseva, Cand. Sc., head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.14:550.422:581.132

БИНАРНЫЕ МАССЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И БИОСФЕРЫ

Лабушев Михаил Михайлович,
mlabushev@yandex.ru

Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания и верификации математических моделей геологических процессов.
Цель работы: определение природных процессов и объектов, которым соответствуют математические модели равных атомных масс.

Метод исследования: логико-математический анализ средних содержаний химических элементов в земной коре и гидросфере и молекулярных масс продуктов фотосинтеза.

Результаты. В результате анализа средних содержаний химических элементов в земной коре и гидросфере обосновывается существование бинарных масс «газы – химические элементы». Такие массы предлагается назвать массами Ферсмана или F-массами. F-массы проявлены в составе земная – океаническая кора, континентальная земная кора – гидросфера, почвенный слой – атмосфера и др. F-массы земной коры должны представлять собой подвижные дисперсные среды, в которых распределены дисперсные фазы. Состояние вещества с такими характеристиками предлагается назвать F-средой. Как глобальную бинарную массу предлагается рассматривать Мировой океан и верхнюю часть литосферы, от средней гипсометрической отметки дна мирового океана и выше, до некоторой глубины от поверхности. Континенты и Мировой океан в интервале гипсометрических отметок «дно – урез воды океана» составляют бинарную массу, соответствующую поверхности раздела на континентах мы должны провести на отметке 312 м ниже уровня Мирового океана. Предполагается, что на континентах эта континентально-океаническая поверхность равных масс располагается приблизительно на глубине 1187 м для участков со средней гипсометрической отметкой поверхности континентов 875 м. Этой глубине соответствует нижняя граница формирования так называемых приповерхностных месторождений (до глубины 1–1,5 км) и приповерхностных со среднеглубинными (глубина от 0,5 до 1–1,5 км) интрузивных массивов. Подобные массы образуются также в результате фотосинтеза. Формирование таких масс предполагает существование дисперсных F-сред. Существование F-масс, вероятно, обусловлено неизвестным ранее свойством материи формировать связанные друг с другом равные массы с гравитационной и инерционной составляющими. Выявление F-масс стало возможным после создания математических моделей равных атомных масс. Изучение F-систем предлагается проводить с использованием программы Agemarker, которая основана на алгоритмах моделей равных атомных масс и имеет открытый исходный код.

Ключевые слова:

Кларки химических элементов, земная кора, фотосинтез, математические модели в геологии, бинарные массы.

Введение

В первой трети XX в. были проведены важнейшие работы по определению среднего состава земной коры [1–3]. Числа, выражающие среднее содержание химических элементов в земной коре, по предложению А.Е. Ферсмана были названы кларками. Отклонение содержаний химических элементов от их кларков позволяет определить концентрацию и рассеяние элементов в природе.

Исследования по кларковой тематике были продолжены [4–6]. Были также рассчитаны кларки химических элементов в гидросфере [7]. Значение кларков как фундаментальных величин не было в полной мере определено из-за отсутствия важной дополнительной информации. Такая информация была получена в институте горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета после создания на основе уравнений теории информации математических моделей равных масс.

В этих моделях половина атомных масс находится в концентрированном состоянии, а половина – в рассеянном. Это модели пропорциональности атомных масс химических элементов в химических соединениях, минералах и горных породах. Методом Монте-Карло по восемь атомных масс из большого массива выбираются для расчетов в матрице 3×3, а девятый элемент представляет собой сумму восьми других.

Такие расчеты дают возможность получить унимодальные распределения больших массивов информационных коэффициентов пропорциональности, которые позволяют количественно характеризовать химические соединения, минералы и горные породы [8, 9]. После создания компьютерной программы Agemarker с открытым исходным кодом, которая реализует указанные алгоритмы, и были проведены поиски природных систем, которые соответствуют расчетным алгоритмам.

Целью данной статьи является определение природных процессов и объектов, которым соответствуют математические модели равных атомных масс. Рассматривается гипотеза о широкой распространенности таких объектов в природе.

Бинарные массы земной коры и биосферы

В начале XX века Ф. Кларк применил фундаментальный подход к расчету среднего состава верхней части земной коры с учетом атмосферы и гидросферы. Это единство было декларировано им уже в первых строках фундаментальной работы «The Data of Geochemistry» [1]. Средний состав горных пород представлялся как в виде таблицы содержаний оксидов и химических элементов, так и отдельно в виде таблицы содержаний каждого химического элемента.

Такой подход был поддержан А.Е. Ферсманом [3], который основывался на идеях В.И. Вернадского. Он провел анализ данных И. Фохта, Ф. Кларка и В.И. Вернадского, и его «кларки земной коры 1932 года» представляют собой наиболее вероятные значения содержаний химических элементов с точки зрения всей доступной информации того времени. Этого оказалось достаточным для достижения нового уровня точности кларков, но для обобщающего заключения необходима была дополнительная информация.

Следует подчеркнуть, что А.Е. Ферсман не представлял оксиды для характеристики химического состава земной коры, он характеризовал только кларки химических элементов, для этого он сам ввел в науку это понятие. Переход к рассмотрению кларков без представления химического состава полностью или частично в виде оксидов, как будет показано далее, имеет решающее значение для понимания геохимических процессов в земной коре. Отметим, что до сих пор термин кларк еще не стал общепринятым.

Фундаментальный подход к определению кларков для земной коры с учетом гидросферы и атмосферы не привел к качественно новым знаниям. Дальнейшие исследования по кларковой проблеме пошли другим путем. Было принято представлять кларки наиболее распространенных химических элементов только для континентальной земной коры [10–17] и для наиболее распространенных химических элементов преимущественно в виде оксидов, в том числе общепринятой практикой становится приведение оксидов к 100 %, равно как и рассмотрение средних содержаний химических элементов в земной коре и отдельных регионах как однородных данных [17]. Принято так же разделять земную кору на верхнюю, среднюю и нижнюю части [18] и рассматривать геохимические данные отдельно по каждой части.

Как будет показано далее, сумма кларков газов земной коры должна быть близка к 50 мас. %. По этому показателю наиболее точны оказались расчеты Ф. Кларка и Г. Вашингтона, А.Е. Ферсмана, соответственно 50,32 и 50,45 %. Для дальнейшего изучения были выбраны кларки указанных исследователей, а для сравнения взяты данные С. Тейлора (таблица).

Ранжирование кларков, рассчитанных А.Е. Ферсманом, и использование информации о возможном равенстве масс химических элементов в рассеянном и концентрированном состоянии позволило выявить примерно равные бинарные массы земной коры, состоящие из масс «газ↔твердые химические элементы» в следующем сочетании: «кислород↔кремний, алюминий, железо, кальций, натрий, калий, магний»; «водород↔титан, углерод»; «хлор↔фосфор, марганец»; «фтор↔барий», «азот↔хром». Такие бинарные массы предлагается назвать массами Ферсмана или F-массами (F-системами в структурном отношении).

Таблица. Сортированные по убыванию кларки наиболее распространенных химических элементов (сортировка по кларкам Ферсмана), мас. %

Table. Clarks of the most common chemical elements sorted in descending, wt %

Химический элемент Chemical element	Кларк и Вашингтон Clarke & Washington, 1922	Ферсман Fersman, 1933	Тейлор Taylor, 1964
Кислород/Oxygen	49,20	49,13	46,4
Кремний/Silicon	25,67	26,00	28,15
Алюминий/Aluminum	7,50	7,45	8,23
Железо/Iron	4,71	4,20	5,63
Кальций/Calcium	3,39	3,25	4,15
Натрий/Sodium	2,63	2,40	2,36
Калий/Potassium	2,40	2,35	2,09
Магний/Magnesium	1,93	2,35	2,33
7 элементов/7 elements	48,23	48,00	52,94
Водород/Hydrogen	0,87	1,00	0,00
Титан/Titanium	0,58	0,61	0,57
Углерод/Carbon	0,08	0,35	0,02
Хлор/Chlorine	0,19	0,20	0,013
Фосфор/Phosphorus	0,11	0,12*	0,105
Марганец/Manganese	0,09	0,10*	0,095
Фтор/Fluorine	0,03	0,08	0,0625
Барий/Barium	0,04	0,05	0,0425
Азот/Nitrogen	0,03	0,04	0,002
Хром/Chromium	0,033**	0,03	0,010

Примечание. Кларк серы взят по Тейлору как 0,026 и оказался вне приведенной в таблице части кларков. *Предположительно точнее по Тейлору, с учетом состава гидросферы и атмосферы эти кларки должны быть уменьшены. **В представлении Ферсмана [3]. Полужирным шрифтом выделены кларки газов.

Note. Sulfur clark was taken as 0,026 by Taylor and appeared to be outside the clarks in the table. *As may be supposed Taylor considered these clarks to be reduced regarding the hydrosphere and atmosphere composition. **As Fersman introduced [3]. Clarks of gases are given in bold type.

Можно сформулировать следующее правило композиции F-масс. Химические элементы с близкими кларками составляют F-массу вместе с газом, кларк которого несколько превышает сумму кларков этих химических элементов и близок к ней. При рассмотрении кларков менее распространенных химических элементов было установлено, что в качестве «газов» могут выступать и некоторые другие химические элементы, например сера и бром.

Кислород и семь следующих за ним по распространенности в земной коре химических элементов являются основными пороодообразующими элементами и в основном распространены совместно. Предполагается, что совместное нахождение в природе является свойством элементов любой F-системы.

Во всех случаях массы газов в бинарных системах немного превышают массы твердых химических элементов. Предполагается, что «недостаток» массы восполняется за счет химических элементов с низкими кларками. Если учитывать кларки всех химических элементов, предполагаем

примерное равенство суммы их масс массе газов. Такие бинарные массы в структурном плане можно рассматривать как системы. В целом бинарная масса земной коры состоит из двух связанных друг с другом равных масс «газы↔твёрдые химические элементы».

В свете проявившихся закономерностей можно говорить о том, что великие геохимики XX в. только в единичных случаях вычисляли кларки химических элементов с достаточной точностью, а А.Е. Ферсман точно определил практически все кларки первых 19 наиболее распространенных в земной коре химических элементов. Он вне всяких сомнений входит в тот ряд ученых «Ломоносов–Менделеев–Кларк–Гольдшмидт–Вернадский», который сам и обозначил в своих трудах.

Для примера рассмотрим бинарную подсистему «водород↔титан, углерод» арктического региона. Предполагается, что Штокмановское газоконденсатное месторождение в Баренцевом море, Ярегское месторождение нефти в республике Коми и Хибинский массив щелочных пород на Кольском полуострове составляют такую бинарную массу.

Штокмановское и Ярегское месторождения относятся к одной Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Геохимическая информация по Штокмановскому месторождению ограничивается данными по распределению токсичных элементов в поверхностном слое донных осадков центральной глубоководной части моря [19].

Ярегскому месторождению вязкой нефти сопутствует крупнейшее в России месторождение титана. В титановых рудах этого месторождения основная масса титана сосредоточена в лейкоксене. Песчаники продуктивной толщи состоят из кварца – 60–70 % и лейкоксена – 5–35 % и содержат нефть [20].

Хибинский массив щелочных пород имеет большие размеры и характеризуется крупными залежами апатит-нефелиновых, титановых и других руд. В Хибинском массиве в большом количестве отмечаются углеводороды [21], которые по составу близки к газам газовых и отчасти газонефтяных месторождений. По современным представлениям этот массив относится к Баренцево-Карской нефтегазоносной провинции.

Бинарные массы также можно обнаружить в биосфере. Состав древесины приблизительно характеризуется содержаниями (в масс. %): углерод – 50, кислород – 42, водород – 6, азот – 1 и сумма содержаний кальция, калия, натрия, магния, железа и марганца – 1 [22]. Таким образом, отчетливо выделяются две бинарные массы древесины: «углерод↔газы» и «азот↔металлы».

Выявленные F-массы не находят объяснения с точки зрения классических представлений о геологических процессах в земной коре. Газы в горных породах в основном связаны в кристаллических решетках минералов горных пород, но имеют возможность проявлять свойства агрегатных состояний газов. Для этого F-массы земной коры

должны представлять собой подвижные дисперсные среды, в которых распределены дисперсные фазы.

Состояние вещества с такими характеристиками предлагается назвать F-средой. Моделью F-среды может служить кристалл кварца с трещинами, заполненными газом и жидкостью. В газе и жидкости присутствуют кристаллики кварца, в газе – жидкость, а в жидкости – газ в условиях разных форм движения вещества.

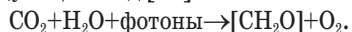
Из-за недостаточной изученности свойств F-среды научное сообщество своевременно не приняло важную модель образования земной коры [23]. Согласно этой модели, мощность и химический состав коры суши и океана определяются охлаждением коры материков нисходящими и нагревом коры океана восходящими растворами. После изменения состава верхних 16 км земной коры средние мощности материковой и океанической кор оказались равны 37 и 7 км соответственно. При этом массы охлажденного и нагретого вещества составляют соответственно $8,74 \cdot 10^{18}$ и $8,76 \cdot 10^{18}$ т. Есть все основания вернуться к рассмотрению этой модели, особенно с учетом недооценки роли воды в процессе развития земного вещества [24].

Как глобальную бинарную массу предлагается рассматривать Мировой океан и верхнюю часть литосферы, от средней гипсометрической отметки дна мирового океана и выше, до некоторой глубины от поверхности. Их взаимосвязь соответствует представлениям о существовании в земной коре сплошной подземной гидросферы со стоком, который в качестве главного базиса дренирования имеет гипсометрическую отметку дна океана [25].

Если принять среднюю высоту суши над уровнем океана и среднюю глубину Мирового океана соответственно равными 875 и 3800 м, а площади поверхности суши и поверхность воды, равными 149,1 и 361,2 млн км², то при средних плотностях верхней части литосферы и морской воды 2,705 и 1,025 т/м³ массы пород суши и вод океанов при принятых ограничениях приблизительно равны $1,88 \cdot 10^{18}$ и $1,412 \cdot 10^{18}$ т. Если континенты и Мировой океан в интервале гипсометрических отметок «дно – урез воды океана» составляют бинарную массу, то соответствующую поверхность раздела на континентах мы должны провести примерно на отметке 312 м ниже уровня Мирового океана.

Предполагается, что на континентах эта поверхность разделения–объединения равных масс, или континентально-океаническая поверхность равных масс, располагается приблизительно на глубине 1187 м для участков со средней гипсометрической отметкой поверхности континентов 875 м. Этой глубине хорошо соответствует нижняя граница формирования так называемых приповерхностных месторождений (до глубины 1–1,5 км) и приповерхностных со среднеглубинными (глубина от 0,5 до 1–1,5 км) интрузивных массивов.

Процессы фотосинтеза в целом проходят с образованием F-масс. Уравнение фотосинтеза растений имеет следующий вид [26]:



Это же уравнение в молекулярных массах:
 $44,0095 + 18,0153 = 30,0260 + 31,9988.$

Молекулярная масса кислорода (газа) немного превышает массу углевода (твердого химического соединения). В природе такого «дефицита» массы нет, процессы фотосинтеза носят сложный характер, который обеспечивает его предельно высокую энергетическую эффективность, например, фотосистема высших растений намного превосходит по термодинамической эффективности эффективность Карно [27]. Такое же соотношение газообразных и твердых химических элементов характерно для упомянутых F-систем земной коры. Фотосинтез бактерий может проходить, например, следующим образом:



Молекулярные массы:

$$44,0095 + 4,03176 = 30,0260 + 18,0153.$$

Анализ приведенных выше и других уравнений природных химических реакций позволяет сформулировать правило неоднородных молекулярных масс: в результате природных химических реакций происходит выравнивание молекулярных масс устойчивых химических соединений, имеющих разные агрегатные состояния.

Важной природной F-массой является атмосфера Земли. Поверхность равных атмосферных масс на высоте 5,5 км определяется в качестве физиологической границы атмосферы, но она проявляет себя уже с высоты 5 км, на которой у нетренированного человека наблюдается кислородное голодание. На высотах 4,8–5,3 км проходит снеговая линия экваториальных и тропических гор (Анды, Килиманджаро, Какабо Рази). По этим данным разреженная часть атмосферы по массе несколько превосходит приповерхностную часть. Недостаток массы здесь вероятно восполняется за счет включения в F-систему атмосферы почвенно-растительного слоя.

По кларкам элементов в гидросфере [7], в массе которой резко преобладают воды океана, можно выделить следующие F-массы: «хлор↔натрий,

магний, сера, кальций, калий», «бром↔углерод (неорганический), стронций, бор, кремний, фтор», «азот↔литий, рубидий», «аргон↔фосфор», «иод↔барий, цинк, молибден, железо, уран, ванадий», «мышьяк↔алюминий, титан, селен» и «криптон↔серебро». Предполагается, что любые изменения в составе гидросферы можно охарактеризовать по изменениям в этих F-массах, вероятно, соответствует действительности и обратное утверждение.

Заключение

В результате рассмотрения разных F-масс сделан вывод, что их существование, вероятно, обусловлено неизвестным ранее свойством материи формировать связанные друг с другом равные массы с гравитационной и инерционной составляющими. Это свойство предлагается рассматривать в связи с принципом эквивалентности гравитационной и инерционной масс, при этом необходимо продолжить междисциплинарные исследования по этой тематике.

Установленные закономерности в приложении к геологии позволяют определить важнейшей задачей изучение геологических F-систем и приводят не просто к возможности, а к необходимости использования программы Agemarker для классификации минералов и горных пород, так как в основе расчетов этой программы лежит использование только одной модели – модели равных масс, которая, вероятно, имеет не только математический, но и онтологический характер.

В междисциплинарном плане, новые закономерности, например, в приложении к экологии, позволяют определить важнейшей задачей изучение экологических F-систем и проводить их исследование на основе моделей равных масс химического состава воздуха, почв, грунтов, поверхностных и подземных вод при инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканиях и стандартизировать обработку результатов анализов при помощи программы Agemarker. Это, в частности, касается исследований вод Северного Ледовитого океана и изысканий объектов капитального строительства в Арктике в условиях уязвимости арктических экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clarke F.W. The Data of Geochemistry // U.S. Geol. Surv., Bull. – 1911. – V. 491. – P. 1–782.
2. Clarke F.W., Washington H.S. The Average Chemical Composition of Igneous Rocks // Nat. Acad. Sci. Proc. – 1922. – V. 8. – № 5. – P. 108–115.
3. Ферсман А.Е. Геохимия. Т. 1. – Л.: Госхимтехиздат, Ленинград. отд-ние, 1933. – 328 с.
4. Goldschmidt V.M. Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente, IX. Die Mengenverhältnisse der Elemente und Atomarten. – Oslo: J. Dybwad, 1938. – 148 S.
5. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. – 1962 – № 7. – С. 555–571.
6. Ронов А.Б., Ярошевский А.А. Новая модель химического строения земной коры // Геохимия. – 1976. – № 12. – С. 1763–1795.
7. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. – М.: Наука, 1967. – 216 с.
8. Лабушев М.М. О предельно возможном числе минералов, неорганических и органических химических соединений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – № 3. – С. 221–233.
9. Labushev M.M., Khokhlov A.N. Relative Dating and Classification of Minerals and Rocks Based on Statistical Calculations Related to Their Potential Energy Index. URL: <http://arxiv.org/abs/1212.2628> (дата обращения: 09.09.2017).

10. Taylor S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1964. – № 28 (8). – P. 1273–1285.
11. Wedepohl K.H. *Geochemie*. – Berlin: Sammlung Götschen, 1967. – 220 S.
12. An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian shield / D.M. Shaw, G.A. Reilly, J.R. Muysson, G.E. Patenden, F.E. Campbell // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1967. – № 4. – P. 829–853.
13. Condie K.C., Aster R.C., Van Hunen J. A great thermal divergence in the mantle beginning 2.5 Ga: Geochemical constraints from greenstone basalts and komatiites // *Geoscience Frontiers*. – 2016. – V. 7 (4). – P. 543–553.
14. Platinum-group element abundances and Re–Os isotopic systematics of the upper continental crust through time: Evidence from glacial diamictites / K. Chen, R.J. Walker, R.L. Rudnick, S. Gao, R.M. Gaschnig, I.S. Puchtel, M. Tang, Z.-C. Hu // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2016. – V. 191. – P. 1–16.
15. Taylor S.R. Tektites, Apollo, the Crust, and Planets: a Life with Trace Elements // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2016. – V. 44. – P. 1–15.
16. Wedepohl H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – № 59. – P. 1217–1239.
17. Compositional evolution of the upper continental crust through time, as constrained by ancient glacial diamictites / R.M. Gaschnig, R.L. Rudnick, W.F. McDonough, A.J. Kaufman, J. Valley, Z.-C. Hu, S. Gao // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2016. – № 186. – P. 316–343.
18. Guerri M., Cammarano F., Connolly J.A.D. Effects of chemical composition, water and temperature on physical properties of continental crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (G3). – 2015. – V. 16. – № 7. – P. 2431–2449.
19. Мищенко А.В., Иванов Г.И. Оценка качества донных осадков центральной глубоководной части Баренцева моря (Штокмановское газоконденсатное месторождение) // *Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых: Труды конференции*. – СПб., 2017. – С. 317–322.
20. Особенности строения, добычи, флотационного способа обогащения и переработки нефтетитановых руд на ОПОФ ОАО «ЯрегаРуда» / В.Н. Землянский, В.И. Власенко, В.Н. Печерин, Т.И. Тимофеева // *Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения*. – 2017. – № 01 (07). – С. 96–107.
21. Нивин В.А. Вариации состава и происхождение углеводородных газов из включений в минералах Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров, Россия) // *Записки российского минералогического общества*. – 2011. – Т. 140. – № 2. – С. 26–37.
22. Barette J.P., Hazard C., Jerome M.J. *Mérotech Bois et Matériaux Associés*. – Paris: Éditions Casteilla, 1996. – 446 p.
23. Григорьев С.М. Роль воды в образовании земной коры (Дренажная оболочка земной коры). – М.: Недра, 1971. – 263 с.
24. Шварцев С.Л. Как образуются сложности? // *Вестник российской академии наук*. – 2014. – Т. 84. – № 7. – С. 618–628.
25. Макаренко Ф.А. Вода под землей // *Круговорот воды* / Сост. Л.С. Абрамов. – М.: Знание, 1966. – С. 86–95.
26. Van Niel C.B. On the morphology and physiology of the purple and green sulfur bacteria // *Archives of Microbiology*. – 1931. – № 3. – P. 1–112.
27. Эффективность Карно и фотосинтез растений / Р. Дженнингс, С. Сантабарбара, Э. Белжио, Дж. Зучелли // *Биофизика*. – 2014. – Т. 59. – Вып. 2. – С. 282–289.

Поступила 20.09.2017 г.

Информация об авторах

Лабушев М.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии месторождений и методики разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 551.14:550.422:581.132

BINARY MASSES OF THE EARTH CRUST AND BIOSPHERE

Mikhail M. Labushev,
mlabushev@yandex.ru

Siberian Federal University,
79, Svobodny avenue, 660041 Krasnoyarsk, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to develop and verify mathematical models of geological processes.

The main aim of the study is to define natural processes and objects that correspond to mathematical models of equal atomic masses.

The methods used in the study is logico-mathematical analysis of average contents of chemical elements in the earth's crust and hydrosphere and molecular masses of photosynthetic products.

The results. The analysis of average contents of chemical elements in the earth's crust and hydrosphere substantiates the existence of binary masses «gases – chemical elements». Such masses are proposed to be called Fersman's, or F-masses. F-masses occur in the composition of continental-oceanic crust, continental crust – hydrosphere, soil layer – atmosphere, etc. as mobile dispersed medias with distributed dispersed phases. The state of matter possessing such characteristics is proposed to be called an F-medium. The World Ocean and the upper part of the lithosphere (from the average level of the ocean floor and up to a certain depth from the surface) is considered to be the global binary mass. Binary mass is formed by continents and the World Ocean in the interval of hypsometric marks «the ocean floor – edge of the ocean water»; we must hold the corresponding interface on the continents at 312 m below the level of the World Ocean. It is assumed that this continental-oceanic surface of equal masses is located on the continents approximately at a depth of 1187 m for areas with average hypsometric elevation of 875 m. This depth corresponds to the lower boundary of the formation of near-surface deposits (to the depth of 1–1,5 km) and near-surface deposits with medium-deep (depths from 0,5 to 1–1,5 km) intrusive massifs. F-masses may also be formed as a result of photosynthesis. The formation of such masses presupposes the existence of dispersed medium. The existence of F-masses is probably caused by the previously unknown property of matter to create mutually connected equal masses with gravity and inertial components. The study of F-systems is proposed to be carried out using the Agemarker open source program. The program is based on algorithms of models of equal atomic masses.

Key words:

Abundances of chemical elements, earth crust, photosynthesis, mathematical models in geology, binary masses.

REFERENCES

- Clarke F.W. The Data of Geochemistry. *U.S. Geol. Surv., Bull.*, 1911, vol. 491, pp. 1–782.
- Clarke F.W., Washington H.S. The Average Chemical Composition of Igneous Rocks. *Nat. Acad. Sci. Proc.*, 1922, vol. 8. no. 5, pp. 108–115.
- Fersman A.E. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Leningrad, Goskhimtekhnizdat Publ., Leningradskoye otdeleniye, 1933. Vol. 1, 328 p.
- Goldschmidt V.M. *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente, IX. Die Mengenverhältnisse der Elemente und Atomarten*. [Geochemical regularities of distribution of elements. IX. Proportions of elements and types of atoms]. Oslo, J. Dybwad, 1938. 148 S.
- Vinogradov A.P. Srednie sodержaniya khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornykh porod zemnoy kory [Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571.
- Ronov A.B., Yaroshevsky A.A. Novaya model khimicheskogo stroyeniya zemnoy kory [A new model of the chemical structure of the earth's crust]. *Geokhimiya*, 1976, no. 12, pp. 1761–1795.
- Vinogradov A.P. *Vvedeniye v geokhimiyu okeana* [Introduction to geochemistry of the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 216 p.
- Labushev M.M. About limit number of minerals, inorganic and organic chemical compounds. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2008, vol. 1, Iss. 3, pp. 221–233.
- Labushev M.M., Khokhlov A.N. Relative Dating and Classification of Minerals and Rocks Based on Statistical Calculations Related to Their Potential Energy Index. Available at: <http://arxiv.org/abs/1212.2628>. (accessed at 09 September 2017).
- Taylor S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, no. 28 (8), pp. 1273–1285.
- Wedepohl K.H. *Geochemie* [Geochemistry]. Berlin, Sammlung Götschen, 1967. 220 S.
- Shaw D.M., Reilly G.A., Muysson J.R., Pattenden G.E., Campbell F.E. An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian shield. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1967, no. 4, pp. 829–853.
- Condie K.C., Aster R.C., Van Hunen J. A great thermal divergence in the mantle beginning 2.5 Ga: Geochemical constraints from greenstone basalts and komatiites. *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7 (4), pp. 543–553.
- Chen K., Walker R.J., Rudnick R.L., Gao S., Gaschnig R.M., Puchtel I.S., Tang M., Hu Z.-C. Platinum-group element abundances and Re–Os isotopic systematics of the upper continental crust through time: Evidence from glacial diamictites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, vol. 191, pp. 1–16.
- Taylor S.R. Tektites, Apollo, the Crust, and Planets: a Life with Trace Elements. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, vol. 44, pp. 1–15.
- Wedepohl H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, no. 59, pp. 1217–1239.
- Gaschnig R.M., Rudnick R.L., McDonough W.F., Kaufman A.J., Valley J., Hu Z.-C., Gao S. Compositional evolution of the upper continental crust through time, as constrained by ancient glacial diamictites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, no. 186, pp. 316–343.
- Guerri M., Cammarano F., Connolly J.A.D. Effects of chemical composition, water and temperature on physical properties of continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G3)*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 2431–2449.
- Mishchenko A.V., Ivanov G.I. Otsenka kachestva donnykh osadkov tsentralnoy glubokovodnoy chasti Barentseva morya (Shtokmanovskoye gazokondensatnoye mestorozhdeniye). *Trudy konferentsii Sergeyevskoye chteniya. Geoekologicheskaya bezopasnost razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Assessment

- of the quality of bottom sediments of the central deep-water part of the Barents Sea (Shtokman gas condensate field)]. St-Petersburg, 2017. pp. 317–322.
20. Zemlyanskiy V.N., Vlasenko V.I., Pecherin V.N. Timofeyeva T.I. Features of structure, extraction, flotation method of enrichment and processing of petroleum titanium ores at the OAO YaregaRuda trial dressing plant. *Resursy Yevropeyskogo Severa. Tekhnologii i ekonomika osvoyeniya*, 2017, no. 01 (07), pp. 96–107. In Rus.
 21. Nivin V.A. Variations in composition and origin of hydrocarbon gases from inclusions in the minerals of the Khibiny and Lovozero alkaline massifs (Kola Peninsula, Russia). *Zapiski rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2011, vol. 140, no. 2, pp. 26–37. In Rus.
 22. Barette J.P., Hazard C., Jerome M.J. *Mémotech Bois et Matériaux Associés*. Paris, Éditions Casteilla, 1996. 446 p.
 23. Grigoryev S.M. *Rol vody v obrazovanii zemnoy kory (Drenazhnaya obolochka zemnoy kory)* [The role of water in formation of the earth's crust (Drainage shell of the earth's crust)]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 263 p.
 24. Shvartsev S.L. Kak obrazuyutsya slozhnosti? [In what way are the difficulties formed?]. *Vestnik rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 618–628.
 25. Makarenko F.A. Voda pod zemley [Groundwater]. *Krugovorot vody* [Water cycle]. Comp. L.S. Abramov. Moscow, Znaniye Publ., 1966. pp. 86–95.
 26. Van Niel C.B. On the morphology and physiology of the purple and green sulfur bacteria. *Archives of Microbiology*, 1931, no. 3, pp. 1–112.
 27. Jennings P., Santabarbara C., Belgio E., Zucchelli G. Efficiency of Carnot and photosynthesis of plants. *Biophysics*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 282–289. In Rus.

Received: 20 September 2017.

Information about the authors

Mikhail M. Labushev, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

УДК 504.55.054:622(470.6)

СНИЖЕНИЕ ДЕФИЦИТА ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Голик Владимир Иванович¹,
v.i.golik@mail.ru

Белодедов Андрей Алексеевич²,
a.a.belodedov@mail.ru

Логачев Александр Владимирович²,
log.a@bk.ru

Шурыгин Дмитрий Николаевич²,
shurygind@mail.ru

¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Южно-Российский государственный политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность и цель исследования. Повышение качества металлических руд при разработке сложноструктурных месторождений подземным способом обеспечивается использованием технологий с закладкой пустот твердеющими смесями, но расширение области применения технологий разработки с закладкой пустот твердеющими смесями ограничивается дефицитом вяжущих цементов. Снижение дефицита вяжущих как средство улучшения качества добываемых руд путем вовлечения в производство минеральных отходов является актуальной задачей горной науки и целью настоящей статьи.

Методы. Методика исследования включает в себя анализ эффективности добычи руд за счет использования техногенных ресурсов при подземной разработке месторождений металлических руд, активацию компонентов твердеющих смесей в лабораторной шаровой мельнице дифференцированно для частей закладочного массива и интерпретацию полученных результатов.

Результаты. Обоснована возможность уменьшения дефицита товарных вяжущих путем изготовления твердеющих смесей на основе утилизируемых металлургических шлаков. Даны результаты исследований параметров активации гранулированного доменного шлака в шаровой мельнице. Установлена зависимость прочности бетонных смесей от продолжительности активации шлака. Рекомендована экономико-математическая модель для определения величины прибыли от утилизации хвостов металлургического производства горной отрасли с учетом потерь при добыче руд. Показано, что утилизация опасных при хранении минеральных отходов позволяет одновременно решать комплекс проблем горного производства.

Выводы. Повышение качества руд при добыче и расширение области применения ресурсосберегающих технологий разработки с закладкой пустот твердеющими смесями достигается использованием доступных и дешевых хвостов технологических процессов техногенных месторождений.

Ключевые слова:

Бетон, гранулированный шлак, мельница, активация, руда, массив, эффективность.

Введение

Показатели деятельности горнорудного предприятия зависят от качества добываемого сырья, а объективными критериями полноты использования недр являются потери и разубоживание руд, которые зависят от природных и техногенных напряжений и возможности управления ими путем заполнения техногенных пустот твердеющими смесями. Критерием оптимальности управления состоянием рудовмещающего массива становятся затраты на управление рудовмещающим массивом с учетом ущерба от потерь и разубоживания. Снижение ущерба от потерь и разубоживания руды компенсирует увеличение затрат на закладку пустот твердеющими смесями.

Эколого-экономическая эффективность горно-промышленного комплекса характеризуется минимальными материальными, энергетическими и другими затратами на производство продукции при приоритете сохранения природных экосистем. При определении прибыли от добычи полезных ископаемых

должны учитываться те ресурсы, которые извлечены из недр, но не нашли своей реализации в виде товарной продукции, а оказались потерянными.

В России назревает переход от открытого способа разработки рудных месторождений полезных ископаемых к подземному способу, при котором необходимость сохранения земной поверхности от разрушения заставляет многократно увеличивать объем использования строительных материалов.

Возникает необходимость рационального использования местного низкосортного дешевого сырья и отходов промышленного производства, прежде всего горнодобывающего. Актуальность проблемы возрастает с учетом удаленности промышленных предприятий от производителей стандартных ингредиентов твердеющих смесей.

Утилизация отходов решает одновременно и экологические проблемы, так как хранящиеся отходы добычи, обогащения и металлургии изымают из пользования земли, отравляют и загрязняют почву, водные артерии и атмосферу.

Твердые отходы промышленных комплексов являются сырьем для производства строительных материалов. Отходами производства являются остатки сырья, материалов или полуфабрикатов, образовавшиеся при изготовлении продукции и полностью или частично утратившие свои потребительские свойства. Наиболее крупную категорию отходов составляют вскрышные и вмещающие породы, металлургические шлаки, топливные золы, хвосты обогатительных фабрик, фосфогипс, глиноземные шламы и др.

Отходы производства подразделяют на вторичные материальные ресурсы и на отходы, переработка которых на данном этапе развития экономики нецелесообразна или невыгодна.

Наибольшие перспективы имеет использование шлаков металлургического производства в качестве вяжущих для твердеющих смесей. Шлаки металлургического комплекса прошли высокотемпературную обработку, их кристаллические структуры сформированы и не содержат органических примесей. Химический состав доменных шлаков сложен, в них встречается до 30 различных химических элементов, влияние которых зависит от количества оксида. Доменные шлаки применяют при изготовлении быстро твердеющего шлакопортландцемента. Внедрение в качестве флюсующей добавки фосфорного шлака позволяет снизить расход сырья на кирпичных заводах на 20 % и повысить прочность бетонных изделий на две марки.

При подземной разработке рудных месторождений полезных ископаемых для сохранения земной поверхности образованные в породных массивах пустоты вслед за извлечением руды заполняют, чаще всего, бетонной смесью. В связи с дефицитностью и высокой стоимостью компонентов твердеющих бетонных смесей стараются использовать дешевые и доступные местные низкоактивные материалы, в первую очередь, хвосты переработки руд [1–3].

Недостаток искусственных закладочных массивов из таких материалов – недостаточная прочность, которую повышают путем осуществления инженерных мероприятий.

Заполнение пустот твердеющими смесями одновременно является средством повышения полноты использования недр, а также полноты и качества добываемых руд [4–6].

Разубоживание руды закладочным материалом снижает эффективность ее обогащения. Например, при добыче руд цветных металлов попадание одного процента закладочных материалов в отбитую руду снижает извлечение металлов в концентрат на 1,0 %, в то время как разубоживание пород – только на 0,10–0,20 %.

В процессе приготовления твердеющих закладочных смесей с целью сокращения расхода компонентов твердеющей закладки при сохранении нужной нормативной прочности в качестве активаторов используют шаровые мельницы. Показателем активности шлаковой добавки является эк-

вивалент активности, который для шаровых мельниц изменяется в пределах 8–20, а в более эффективных активаторах, например дезинтеграторе, – в пределах 6–8 [7–10].

Активизированные материалы характеризуются более однородной микроструктурой за счет увеличения качества гидратации цемента в 2–3 раза и равномерного распределения компонентов смеси.

С понижением уровня требований к компонентам твердеющей закладки оказались пригодными низкосортные материалы, в частности материалы с модулем крупности менее 0,7, а также содержащие примеси материалы.

Вяжущая способность новых материалов характеризуется изменением прочности твердеющей смеси на их основе по сравнению с базовой смесью на основе стандартного материала:

$$\sigma_{\text{ц}} = a g_{\text{ц}}^B \sigma_{\text{цн}}, \text{ МПа},$$

где a , B – эмпирические коэффициенты, учитывающие марку цемента (табл. 1); $\sigma_{\text{цн}}$ – собственная активность цемента, МПа.

С изменением марки цемента от 300 до 600 коэффициент увеличивается в интервале от $0,25 \cdot 10^{-2}$ до $1,81 \cdot 10^{-2}$, а коэффициент снижается от 1,0 до 0,67.

Компоненты твердеющей бетонной смеси разделяют на заменители цемента и создающие несущую среду при транспортировании добавки. Доменные шлаки, фторогипсы, фосфогипсы и белитовые шламы в качестве вяжущих используют после активации их до выхода 70 % частиц крупностью 0,076 мм.

В шаровых мельницах при переработке компонентов смеси центробежная сила в барабане не может превысить силу тяжести, поэтому энергетического воздействия высоких порядков создать невозможно. Удельная поверхность материалов здесь увеличивается до $3000 \text{ см}^2/\text{г}$, что повышает активность материалов не более чем на 20–30 %. При этом выход активного шлака составляет от 300 до 600 кг/т чугуна.

Использование добавок изменяет прочность цементной закладки:

$$\sigma_{\text{ц}} = c a g_{\text{ц}}^B \sigma_{\text{цн}}, \text{ МПа},$$

где c – эмпирический коэффициент, учитывающий свойства заполнителей: для песка –1,0, для хвостов обогащения –0,9, для дробленой породы с содержанием илстых и глинистых до 30 % –0,8 (табл. 2).

Обоснование экономической целесообразности и технологической возможности использования отходов производства в качестве вяжущих для увеличения области применения закладочных технологий является целью исследований проблем горного производства [11–15].

Методы исследования

Для достижения поставленной цели исследованы наиболее часто применяемые варианты закла-

дочных смесей: вариант 1 – для нижней части закладочного массива и вариант 2 – для верхней части закладочного массива (табл. 1):

Таблица 1. Характеристика бетонных смесей

Table 1. Characteristic of ready mix concrete

Компоненты Components	Единицы Unit	Расход компонентов, кг/м³ Flow of components, kg/m³	
		Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2
Шлакопортландцемент M-400 Slag Portland Cement M-400	кг/м³ kg/m³	80	40
Гранулированный шлак Granulated slag		420	400
Песчано-гравийная смесь 50 % Sand-gravel mixture 50 %		591	657
Дробленая порода 50 % Crushed rock 50 %		614	682
Вода/Water	л/м³/l/m³	570	350

Если удельная поверхность исходного немолотого гранулированного шлака составляла 9,38 м²/кг, то при увеличении тонкости помола граншлака с 20 до 60 % выхода класса –0,08 мм поверхность увеличилась (табл. 2).

Результаты

Выход продукта крупностью –0,08 мм в зависимости от продолжительности активации характеризуется рис. 1.

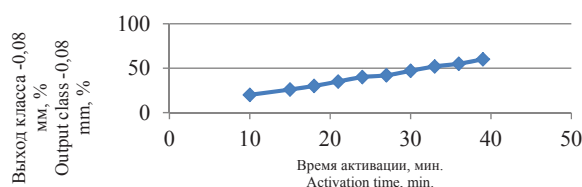


Рис. 1. Выход активной фракции гранулированного шлака

Fig. 1. Output of active fraction of granulated slag

Характеристика составов смеси для обоих вариантов и результаты их испытаний сведены в табл. 3.

Таблица 2. Характеристика активированного в мельнице шлака

Table 2. Feature of slag activated in the mill

Время активации, мин Activation time, min	Выход класса –0,08 мм, % Class output –0,08 mm, %	Ситовый анализ, класс, мм, выход, %/Sieve analysis, class, mm yield, %												Удельная поверхность, м²/кг Specific surface, m²/kg	Приращение удельной поверхности, м²/кг Increment of specific surface, m²/kg
		2,5	1,6	1,0	0,63	0,4	0,315	0,2	0,16	0,1	0,063	0,05	–0,5		
10	20	0,17	0,09	0,17	1,31	12,15	15,0	20,79	10,68	12,15	12,99	2,13	12,34	27,34	17,96
18	30	0,4	0,6	0,3	0,1	2,0	7,0	18,7	13,0	16,78	17,66	3,15	20,31	33,86	24,48
24	40	0,19	0,12	0,11	0,12	0,4	2,27	11,95	13,09	19,09	21,36	8,16	23,14	38,18	28,8
30	47	0	0	0,02	0,02	0,12	0,96	9,26	11,53	18,88	23,23	10,29	25,69	40,04	30,66
36	55	0	0	0	0,04	0,04	0,21	3,99	7,87	18,35	28,36	18,85	22,29	42,54	33,16

Таблица 3. Результаты испытаний бетонных смесей

Table 3. Test results of concrete mixtures

Пробы/Sample	Время активации Activation time	Выход класса –0,08 мм, % Output of class –0,08 mm, %	Объемный вес смеси Volumetric weight of the mixture	Водоотделение, % Water separation, %	Предельное напряжение сдвига, Па Critical shear stress, Pa	Прочность кубов, МПа, дни Strength of cube, MPa, days		
						28	90	360
Вариант 1/Option 1								
1	10	20	2,0	1,7	100–130	3,2	4,9	5,9
2	15	26	2,1	2,2	80–90	6,8	10,3	15,0
3	18	30	2,0	1,7	90–100	4,6	6,9	9,7
4	21	35	2,0	1,2	70–80	5,0	8,1	9,5
5	24	40	2,0	1,5	70–80	6,9	8,6	11,4
6	27	42	2,1	2,2	60–110	6,9	9,6	13,1
7	30	47	2,1	1,0	60–80	5,4	9,9	11,1
8	33	52	2,0	2,2	50–90	5,6	10,1	11,5
9	36	55	2,1	2,2	55–70	5,7	10,1	12,8
10	39	60	2,1	1,0	55–75	6,6	10,2	13,1
Вариант 2/Option 2								
1	10	20	2,0	4,0	130–160	1,4	2,5	2,8
2	15	35	2,0	3,0	130–140	1,7	2,7	3,4
3	18	40	2,0	2,0	100–130	2,4	3,2	4,2
4	21	25	2,0	4,0	110–140	2,45	3,4	4,1
5	24	45	2,0	3,5	90–130	3,2	3,9	5,6
6	27	55	2,0	2,0	100–110	3,6	4,2	6,9
7	30	75	2,0	3,0	80–100	3,6	4,6	6,4
8	33	60	2,0	3,0	90–90	3,1	7,0	8,1

С увеличением тонкости помола шлака класса –0,08 мм с 20 до 40 % прочность смеси возросла (рис. 2):

- для варианта 1 с 3,2 до 5,0 МПа в возрасте 28 дней, и с 4,9 до 8,0 МПа в 90 дней;
- для варианта 2 с 1,4 до 2,4 МПа в 28 дней и с 2,5 до 3,2 МПа в 90 дней.

А с увеличением тонкости помола шлака класса –0,08 мм до 60 % (рис. 3):

- для варианта 1 с 3,2 до 6,6 МПа в 28 дней и с 4,9 до 10,0 МПа в 90 дней варианта 1;
- для варианта 2 с 1,4 до 3,6 МПа в 28 дней и с 2,5 до 4,5 МПа в 90 дней.

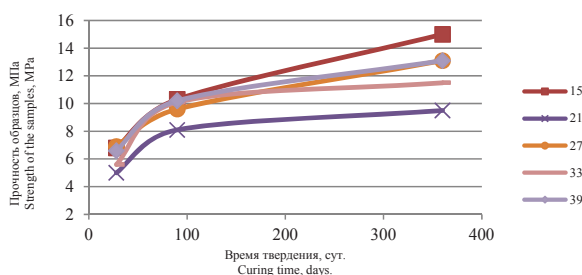


Рис. 2. Прочность образцов бетона для варианта 1

Fig. 2. Strength of concrete samples for option 1

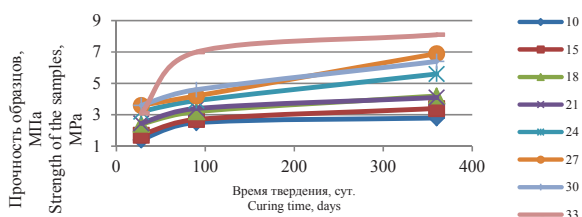


Рис. 3. Прочность образцов бетона варианта 2

Fig. 3. Strength of concrete samples for option 2

С увеличением времени измельчения и активации компонентов в мельнице выход активных фракций граншлака закономерно увеличивается с 30 до 50–60 %.

Прибыль от утилизации хвостов переработки руд для приготовления твердеющих смесей [14–18]:

$$\Pi = \Pi_{\text{т}} - \text{З}_{\text{д}} - \text{Л}_{\text{з}} \Pi_{\text{п}} \left(\frac{1 - \Pi}{\Pi} \right) - \left(\frac{\text{Р}}{1 - \text{Р}} \right) - \left(\text{З}_{\text{д}} + \frac{\text{З}_{\text{у}}}{\gamma} \right),$$

где $\Pi_{\text{т}}$ – цена 1 т товарной руды, р/т; $\text{З}_{\text{д}}$ – затраты на добычу руды, р/т; $\text{Л}_{\text{з}}$ – потери относительно погашаемых балансовых запасов, доли ед.; $\Pi_{\text{п}}$ – цена потерянной руды, р/т; Π – потери руды, доли ед.; Р – разубоживание руды, доли ед.; $\text{З}_{\text{у}}$ – затраты на упрочнение рудного массива, р/т; γ – объемный вес руды, т/м³;

Использование низкоактивных материалов с подготовкой в активаторах позволяет сохранить или увеличить объем производства, вернуть в хозяйственный оборот занятые под хвостохранили-

ща земли, уменьшить негативное влияние отходов на окружающую среду [16–18]. Дальнейшее повышение активности компонентов бетонных смесей осуществляется в рамках механохимической технологии [18–20].

Несмотря на приоритетное внимание к технологиям разработки месторождений с закладкой твердеющими смесями, важный фактор использования хвостов переработки руд в составе твердеющих смесей не превышает первых процентов, поэтому среди направлений совершенствования горного производства проблема поисков сырья для приготовления твердеющей закладки становится все актуальнее.

Препятствием для реализации технологий с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями является наличие в них не извлеченных при переработке металлов. Возможность решения обозначенной проблемы предоставляет применение механохимической технологии переработки некондиционного минерального сырья с улучшением свойств минералов одновременно энергетическим и химическим воздействием, в результате чего извлекаются потерянные металлы, и повышается качество низкоактивных ингредиентов смесей.

Выводы

При подземной разработке металлических месторождений повышение качества руд обеспечивается использованием технологий с закладкой пустот твердеющими смесями на основе хвостов переработки минерального сырья.

Дефицит вяжущих для увеличения диапазона использования технологий разработки с закладкой твердеющими смесями уменьшается при использовании активированных доменных шлаков. Активация шлака в шаровой мельнице повышает прочность закладочной смеси в 1,5–2 раза.

Использование инновационных технологий активации компонентов бетонных смесей является резервом оздоровления экономики горных предприятий и улучшения экологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
2. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.
3. Ермолович О.В., Ермолович Е.А. Композиционные закладочные материалы с добавкой из механоактивированных отходов обогащения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 3. – С. 13–24.
4. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China / G. Wang, R. Li, E.J.M. Carranza, F. Yang // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 71. – P. 592–610.
5. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. – Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.
6. Новая технология и оборудование для высокопроизводительной закладки выработанного пространства при подземной отработке месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, В.А. Арсентьев, В.В. Квитка, Р.Ш. Маннанов // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 41–43.
7. Дмитрак Ю.В., Шишканов К.А. Разработка вероятностной кинематической модели мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12. – С. 302–308.
8. Дмитрак Ю.В., Шишканов К.А. К вопросу о численном моделировании взаимодействия мелющих тел в мельницах тонкого измельчения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12. – С. 309–313.

9. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
10. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. – 2017. – V. 61. – P. 40–57.
11. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 1. – С. 10–15.
12. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // Journal of the Social Sciences. – 2015. – V. 10. – № 6. – P. 750–754.
13. Calculation and Management for Mining Loss and Dilution under 3D Visualization Technical Condition / Weijing Wang, Shaofeng Huang, Xiaobo Wu, Qingfei Ma // Journal of Software Engineering and Applications. – 2011. – V. 4. – P. 329–334.
14. Calculation of loss ratio and dilution ratio on end ore drawing based on random medium ore drawing theory / Zhen-Dong Liu, Gan-Jiang Tao, Qing-Yun Ren, Dong-Sheng Yang // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society. – 2011. – V. 36 (4). – P. 450–455.
15. Шестаков В.А., Разоренов Ю.И., Габараев О.З. Управление качеством продукции на горных предприятиях. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет, 2001. – 262 с.
16. Xiao Li-ping. Study on Pollution Laws of Coal Gangue Leaching Solution to Groundwater System. – Fuxin: Liaoning Technical University, 2007. – P. 345–356.
17. Onica I., Cozma E., Goldan T. Land Degradation Under the Underground Mining Influence (in Romanian) // AGIR Revue. – 2006. – № 3. – P. 14–27.
18. Merkel B.J., Planner-Freidrich B. Groundwater Geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. – Berlin: Springer, 2005. – P. 230–238.
19. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codos by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 17. – P. 38105–38109.
20. The history of Russian Caucasus ore deposit development / V.I. Golik, Yu.I. Razorenov, V.N. Ignatov, Z.M. Khasheva // Journal of the Social Sciences. – 2016. – V. 11. – № 15. – P. 3742–3746.

Поступила 29.09.2017 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Геофизического института Владикавказского научного центра РАН Северо-Кавказского государственного технологического университета.

Белодедов А.А., кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела, декан горного факультета Южно-Российского государственного политехнического университета.

Логачев А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета

Шурыгин Д.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Южно-Российского государственного политехнического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

REDUCTION OF DEFICIT IN BINDERS FOR BACKFILLING MIXTURES

Vladimir I. Golik¹,
v.i.golik@mail.ru

Andrey A. Belodedov²,
a.a.belodedov@mail.ru

Alexander V. Logachev²,
log.a@bk.ru

Dmitriy N. Shurygin²,
shurygind@mail.ru

¹ North-Caucasian State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² South-Russian State Polytechnic University,
132, Prosvescheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

Relevance and aim of the study. Improving the quality of metal ores in development of complex deposits by underground method is provided by the use of technology with the laying of the cavities hardening compounds, but the extension of the scope of technology development with the laying of the cavities hardening mixtures is limited by lack of binding cements. Reduction of deficit in binders as a means of improving the quality of extracted ores through the involvement of mineral waste in production is an urgent task of mining science and the aim of the research.

Methods. Research methodology includes the analysis of efficiency of ore extraction through the use of anthropogenic resources in underground development of deposits of metal ores, activation of components of solid mixtures in a laboratory ball mill for differentiated parts of the backfill array and interpretation of the results.

Results. The authors have proved the possibility of reducing the deficit in the goods by making the binder solid mixtures on the basis of the utilized slag. The paper introduces the results of studies of the activation parameters of the granulated blast furnace slag in ball mill. The authors determined the concrete mixture strength dependence on duration of slag activation and recommended the economic-mathematical model to determine the amount of profit from the disposal of tailings the metallurgical mining industry, taking into account the lost in ore extraction. It is shown that the disposal of hazardous during storage of mineral waste allows solving a set of problems in mining industry.

Conclusions. Improving the quality of ores in their extraction and extension of application area of resource-saving technologies of exploration with voids bookmark with hardening mixtures is achieved by using available and cheap tails of technological processes.

Key words:

Concrete, granulated slag, mill, activation, ore, pattern, efficiency.

REFERENCES

1. Komashchenko V.I., Vasilev P.V., Maslennikov S.A. Reliable raw material basis for technology of underground mining KMA. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
2. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of disposal of mining waste for their processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 23–30. In Rus.
3. Ermolovich O.V., Ermolovich E.A. Composite filling materials with addition of mechanochemically activated waste enrichment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, no. 3, pp. 13–24. In Rus.
4. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 592–610.
5. Jarvie-Eggart M.E. *Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World*. Englewood, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
6. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Arsentev V.A., Kvitka V.V., Mannanov R.Sh. New technique and equipment for high-performance space laying-out at deposit underground mining. *Gorny zhurnal*, 2012, no. 2, pp. 41–43. In Rus.
7. Dmitrak Yu.V., Shishkanov K.A. Development of probabilistic kinematic model of grinding bodies in a grinding chamber of vibration mill. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2010, no. 12, pp. 302–308. In Rus.
8. Dmitrak Yu.V., Shishkanov K.A. To the issue of numerical simulation of grinding bodies interaction in the fine grinding mills. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten*, 2010, no. 12, pp. 309–313. In Rus.
9. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. The concept of combining ore deposit development techniques. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2015, no. 4, pp. 76–88. In Rus.
10. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*, 2017, vol. 61, pp. 40–57.
11. Lyashenko V.I. Nature protection technologies of exploring complex mineral fields. *Marksheydersky vestnik*, 2015, no. 1, pp. 10–15. In Rus.
12. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste. *Journal of the Social Sciences*, 2015, vol. 10, no. 6, pp. 750–754.
13. Weijing Wang, Shaofeng Huang, Xiaobo Wu, Qingfei Ma. Calculation and Management for Mining Loss and Dilution under 3D

- Visualization Technical Condition. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2011, vol. 4, pp. 329–334.
14. Zhen-Dong Liu, Gan-Jiang Tao, Qing-Yun Ren, Dong-Sheng Yang. Calculation of loss ratio and dilution ratio on end ore drawing based on random medium ore drawing theory. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2011, vol. 36 (4), pp. 450–455.
15. Shestakov V.A., Razorenov Yu.I., Gabaraev O.Z. *Upravlenie kachestvom produktsii na gornyykh predpriyatiyakh* [Product quality management in mining]. Novocherkassk, South-Russian State Polytechnic University Press, 2001. 262 p.
16. Xiao Li-ping. *Study on Pollution Laws of Coal Gangue Leaching Solution to Groundwater System*. Fuxin, Liaoning Technical University, 2007. pp. 345–356.
17. Onica I., Cozma E., Goldan T. Land Degradation Under the Underground Mining Influence (in Romanian). *AGIR Revue*, 2006, no. 3, pp.14–27.
18. Merkel B.J., *Planner-Freidrich B. Groundwater Geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems*. Berlin, Springer, 2005. pp. 230–238.
19. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105–38109.
20. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Ignatov V.N., Khasheva Z.M. The history of Russian Caucasus ore deposit development. *Journal of the Social Sciences*, 2016, vol. 11, no. 15, pp. 3742–3746.

Received: 29 September 2017.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, North-Caucasian State Technological University.

Andrey A. Belodedov, Cand. Sc., associate professor, Dean of the faculty, South-Russian State Polytechnic University.

Alexander V. Logachev, Cand. Sc., associate professor, South-Russian State Polytechnic University.

Dmitriy N. Shurygin, Cand. Sc., associate professor, South-Russian State Polytechnic University.

УДК 622.24.063

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БУРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Янгиров Фарит Наилевич¹,
bngs-ufa@mail.ru

Яхин Артур Рамилевич¹,
9406622@mail.ru

Мустафин Тимур Салаватович¹,
tumyr-77@mail.ru

Дихтярь Татьяна Дмитриевна²,
dihthtd@gmail.com

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет в г. Октябрьском,
Россия, 452620, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54.

Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения эксплуатационных свойств смазочных материалов, применяемых в буровой технологии. В целом их использование приводит к уменьшению абразивного и усталостного износа материала рабочих инструментов, увеличивает срок службы бурового оборудования и бурильного инструмента, что особенно важно для безаварийной работы и повышения технико-экономических показателей при бурении скважин.

Цель исследования: разработать методику выбора оптимального образца смазочной композиции для повышения долговечности и герметичности резьбовых соединений бурильного инструмента путем определения толщины граничного слоя различных смазочных материалов на специально разработанном устройстве.

Методы исследования. Лабораторные испытания свойств (средняя толщина граничного смазочного слоя, критическая нагрузка, нагрузка сваривания, индекс задира, показания износа) различных смазывающих композиций проведены на разработанном устройстве и четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 (ГОСТ 32501–2013).

Результаты. Разработанный экспрессный метод выбора смазочного материала по несущей способности, основанный на определении удельной толщины граничного смазочного слоя (метод «стопы»), позволяет подобрать оптимальный образец из испытуемых смазочных композиций. Проведены исследования по определению оптимального процентного содержания присадки на основе соединений серы, добавляемой с целью улучшения эксплуатационных свойств резьбовой смазки Р-416 (ТУ 301–04–020–92). Рекомендовано применение разработанного устройства для дальнейших исследований эксплуатационных свойств смазочных материалов.

Выводы и рекомендации. Разработан экспрессный метод оптимального выбора смазочного материала по несущей способности (методика определения толщины граничного слоя смазки методом «стопы»), испытана присадка МФП-1 на основе сернистых соединений. Результаты испытаний показали, что присадка МФП-1, в определенных пределах соотношения к смазочному материалу, повышает устойчивость к нагрузкам, уменьшает износ трущихся поверхностей и продлевает срок службы элементов трения. Рекомендуется применение разработанного устройства для дальнейших исследований свойств смазочных материалов.

Ключевые слова:

Резьбовые соединения бурильной колонны, резьбовые смазки, метод «стопы», толщина граничного смазочного слоя, нагрузка, триботехнические параметры, присадка.

Введение

Повышение эксплуатационного ресурса резьбовых соединений колонны бурильных труб, другого оборудования и инструмента является особенно важным для безаварийной работы и повышения технико-экономических показателей при бурении скважин. В результате преждевременного износа резьбы и упорных поверхностей ежегодно выбраковываются сотни тысяч замковых деталей вместе с приваренными бурильными трубами [1, 2]. Десятки тысяч тонн стальных бурильных и утяжеленных труб, изготовленных из высококачественной легированной стали (марки 40ХН2МА, 38ХНЗМФА, 45ХГМА и др.) и имеющих в своей конструкции наиболее слабый элемент – резьбовое соединение – не в полной мере используют свой эксплуатационный ресурс [3, 4].

В первую очередь на проникаемость резьбовых соединений влияют конструктивные особенности резьбы. Зазоры в резьбе представляют собой винтовые каналы и носят название конструктивных. Основное назначение конструктивных зазоров – обеспечение удовлетворительного свинчивания–развинчивания резьбовых соединений [5].

Кроме конструктивных зазоров резьбе присущи также зазоры технологического характера, которые определяются отклонением элементов профиля от теоретических (номинальных) размеров [6]. Конструктивные и технологические зазоры в резьбе приводят к тому, что контакт трубы с муфтой в резьбовых соединениях оказывается проникаемым, т. е. соединение само по себе негерметично. Для снижения проникаемости контакта элементов резьбовых соединений в практике приме-

няют различные наполнители конструкционных и технологических зазоров – резьбовые смазки [7]. Резьбовые смазки кроме заполнения зазоров должны предупреждать задиры и заедания резьбовых соединений труб.

Одной из характеристик процесса трения–изнашивания является толщина слоя смазки в месте наибольшего сближения поверхностей контакта [8]. Толщина смазочного слоя оказывает влияние на работоспособность и долговечность трущихся поверхностей. От неё зависят: контактная прочность, силы трения, износостойкость, несущая способность по заеданию, температура силовых контактов [9].

Многие исследователи проявляют исключительный интерес к изменению толщины масляной пленки между контактирующими поверхностями, поэтому существует много методов изучения тонких слоев жидкости на твердых поверхностях, такие как: метод измерения электрической емкости, величины электрического тока во фрикционном контакте и прочие [10]. Также в области трения разработаны различные способы и правила, относящиеся к элементам пар трения при граничной полужидкостной смазке и трении без смазочного материала, к подбору материалов, способам упрочнения поверхностного слоя металла и вопросам смазки [11–13].

В процессе проведения спуско-подъемных операций замковые резьбовые соединения многократно свинчиваются–развинчиваются. При этом на резьбовые соединения действуют значительные контактные нагрузки, которые при взаимодействии сопрягаемых пар приводят к их изнашиванию. Интенсивность этих процессов при многократном свинчивании–развинчивании определяется рядом факторов, одним из которых является тип применяемого антифрикционного уплотнительного состава (резьбовой смазки) [14].

Исследование смазочных материалов на разработанном устройстве, реализующем метод «стопы»

Для анализа процесса изнашивания поверхностей трения следует рассматривать механизм защитного действия смазочных материалов, прочно связанных с металлом граничных смазочных слоев. Металлические поверхности покрываются пленками, которые эффективно защищают поверхность от изнашивания [15, 16]. На кафедре бурения нефтяных и газовых скважин УГНТУ нами была предложена принципиальная схема для реализации метода «стопы» с целью экспериментального определения толщины граничного смазочного слоя и изготовлено соответствующее устройство (рис. 1).

Устройство работает следующим образом.

Цилиндрическая трубка – 3 жестко крепится к стойке – 2 устройства, смонтированной вертикально относительно стола-основания – 1. Затем по

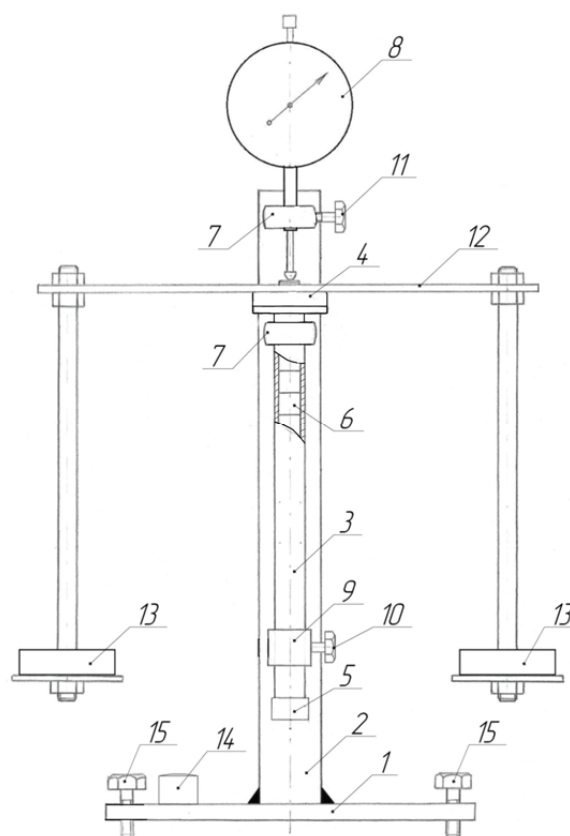


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для измерения толщины граничного слоя смазочных материалов: стол-основание – 1 с вертикально закрепленной на сварке стойкой – 2, цилиндрическая трубка – 3 с наливной – 4 и сливной – 5 крышками, бочкообразные ролики – 6, верхние крепления – 7 для трубки и микрометра – 8, нижнее крепление – 9 для трубки с фиксирующим винтом – 10, микрометр – 8 с фиксирующим винтом – 11, коромысло – 12 со съемными грузами – 13, уровень – 14, винты – 15, регулирующие горизонтальное положение стола-основания – 1

Fig. 1. Schematic diagram of the installation: a housing – 1 with a stand – 2, vertically fixed on the weld, a cylindrical tube – 3 with a filler – 4 and a drain – 5 covers, barrel rollers – 6, upper tube holders – 7 and a micrometer – 8, a lower tube attachment – 9 with a fixing screw – 10, a micrometer – 8 with a fixing screw 11, rocker – 12 with removable weights – 13, level – 14, screws – 15, adjusting the horizontal position of the base table – 1

уровню – 14 стол-основание – 1 выставляется горизонтально с помощью специальных регулирующих винтов – 15. В цилиндрическую трубку – 2 с закрытой сливной крышкой – 5 последовательно помещаются бочкообразные ролики – 6, на которые предварительно наносится исследуемая смазка. После того как ролики – 6 размещены в цилиндрической трубке – 3, ее закрывают крышкой – 4 и устанавливают сверху коромысло – 12. Для исключения воздушных пузырей на границе соприкосновения роликов – 6, коромысло – 12 ненадолго нагружают. После этого устанавливают микрометр – 8 (индикатор ИЧЦ-10-0,001; ТУ 3942-017-74229882-2014) с упором ножки на по-

верхность крышки – 4, фиксируют его винтом – 11 и записывают показания. Последующие измерения перемещения крышки – 4 проводят с постепенным увеличением осевой нагрузки с помощью съемных грузов – 13, которые устанавливаются на коромысло – 12. После проведения опытов, прибор разбирают в обратной последовательности, извлекают все ролики – 6, проталкивая их через сливную крышку – 5. Проводится очистка всех элементов прибора, соприкасающихся с исследуемой смазкой.

Расчет толщины граничного слоя h проводится по полученной нами формуле:

$$h = \frac{\Delta M}{2(n+2)},$$

где ΔM – разность показаний микрометра до и после нанесения смазки; n – число роликов.

Устройство обеспечивает измерение толщины граничного слоя смазочных материалов с погрешностью до 4 % за счет применения бочкообразных роликов и увеличения площади контакта граничных поверхностей. Также устройство позволяет измерять толщину граничного слоя в условиях повышенных осевых нагрузок за счет установленного коромысла со съемными грузами. Это позволяет более эффективно определять несущую способность граничных смазочных слоев при разработке новых смазочных композиций.

Для повышения точности полученных результатов каждый опыт проводится минимум 3 раза. Шероховатость бочкообразных роликов измерялась на приборе TR-110 (портативный измеритель шероховатости), были получены следующие значения:

- $Ra=0,53$ мкм – среднее арифметическое отклонение профиля;
- $Rz=2,74$ мкм – высота неровностей профиля по десяти точкам.

В качестве испытуемых смазочных материалов применялись: промышленное масло И-20А (ГОСТ 20799–88), графитная смазка (ГОСТ 3333–80), солидол (ГОСТ 4366–76), а также резьбовая смазка Р-416 (ТУ 301–04–020–92).

Результаты предварительных опытов приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что значения толщины граничного смазочного слоя для различных смазочных материалов существенно отличаются. Наибольшее значение показала смазочная добавка графитная смазка, что подтверждает ее эффективность в ранее проведенных исследованиях [12]. Согласно элементарным представлениям о трении, считается, что в процессе изнашивания неровности одной поверхности зацепляются за неровности сопряженной поверхности. Это приводит к срезанию и выламыванию неровностей при скольжении поверхностей. Поэтому минимальная толщина граничного смазочного слоя h для обеспечения жидкостного трения должна быть как минимум больше суммы шероховатостей [17, 18].

Таблица 1. Результаты испытаний различных смазочных материалов

Table 1. Test results for various lubricants

Испытуемый образец Test sample	Номер опыта Number of experience	Показания микрометра, мкм Micrometer readings, μm	Толщина смазочного слоя h , мкм Thickness of the lubricating layer h , μm	Средняя толщина граничного смазочного слоя, мкм Average thickness of the lubricating layer, μm
И-20А I-20A	1	57	2,71	2,39
	2	56	2,66	
	3	46	2,19	
	4	49	2,33	
	5	43	2,05	
Солидол Solidol	1	93	4,42	4,76
	2	92	4,38	
	3	99	4,71	
	4	102	4,90	
	5	106	5,29	
Графитная смазка Graphite grease	1	150	6,14	6,66
	2	169	7,05	
	3	165	6,86	
	4	158	6,52	
	5	161	6,66	

Если посмотреть на профиль конической замковой резьбы (ГОСТ Р 50864), то видно, что ее износ в процессе свинчивания–развинчивания происходит не по всей длине контактирующей поверхности, а по поверхности контактного трения, которые имеют шероховатость, соответствующую характеру и интенсивности изнашивания материалов, из которых изготовлены эти бурильные трубы.

Для учета влияния шероховатости на состояние смазочного слоя предложено ввести удельную толщину смазочного слоя, определяемую по формуле (1) [19]:

$$\lambda_{уд} = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 – среднеквадратичные отклонения амплитуд шероховатости соответственно первой и второй контактирующих поверхностей.

По параметру $\lambda_{уд}$ можно оценить способность смазочного материала предотвращать или минимизировать износ и задир, а также снижать усталость материалов при трении. Результаты многочисленных экспериментов показали, что при $\lambda_{уд} < 1$ возникает граничное трение и происходит значительное повреждение трущихся поверхностей; при $1 < \lambda_{уд} < 1,5$ наблюдается смешанное трение (сочетание граничного и жидкостного), сопровождаемое процессом изнашивания поверхностей; при $1,5 < \lambda_{уд} < 3$ кратковременно возникает граничное трение, а в целом осуществляется режим жидкостного трения; при $3 < \lambda_{уд} < 4$ трение почти полностью жидкостное, износ поверхностей очень незначительный; при $\lambda_{уд} > 4$ трение полностью жидкостное [20, 21].

Зная шероховатость поверхности замковой резьбы по ГОСТ 28487–90 $Ra \ll 3,2$ мкм и толщину смазочного слоя, можно определить наиболее предпочтительную концентрацию присадки.

Исследование влияния нагрузки на несущую способность смазочного материала

В процессе бурения на резьбовые соединения буровой колонны действуют значительные статические и динамические нагрузки, которые определяют ее сложное напряженное состояние. Из большого числа различных усилий, действующих на соединительные элементы буровой колонны, можно выделить наиболее характерные из них [22–24]:

- осевые усилия растяжения от собственного веса колонны, которые возрастают по мере приближения к устью скважины;
- осевые усилия сжатия в нижней части колонны, возникающие при создании нагрузки на долото за счет веса утяжеленных буровых труб (УБТ);
- дополнительные усилия растяжения в ниппеле замкового соединения от момента затяжки;
- крутящий момент, необходимый для вращения колонны и долота;
- переменный изгибающий момент, возникающий при работе колонны на искривленных участках ствола скважины, от продольного изгиба при сжатии и под действием центробежных сил;
- усталость материала резьбы от знакопеременных, циклических напряжений;
- динамические нагрузки при проведении спуско-подъемных операций (СПО);
- дополнительные растягивающие усилия при прокачивании бурового раствора через колонну буровых труб;
- динамические усилия, связанные с вибрацией колонны от перекачивания по забою долота и пульсации подачи бурового раствора.

Исследование влияния нагрузки на несущую способность смазочного материала также представляет большой интерес. С этой целью был проведен ряд опытов с нагружением от 0 до 10 кг. Результаты опытов для двух различных смазок приведены на рис. 2.

Как видно из данных рис. 2, толщина граничного смазочного слоя уменьшается с повышением нагрузки, что ожидаемо. Для более детального анализа изменения толщины смазочного слоя с учетом повышенных нагрузок для резьбового соединения буровых труб была выбрана резьбовая смазка Р-416. Результаты опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты испытаний резьбовой смазки Р-416

Table 2. The results of tests of R-416

Испытуемый образец Test sample	Нагрузка, кг Load, kg	Показания микрометра, мкм Micrometer readings, μm			
		Опыт/Experiment			Среднее Average
		1	2	3	
Р-416 R-416	0	71,48	71,43	71,41	71,44
	1	48,18	48,10	48,06	48,11
	2	41,52	41,43	41,37	41,44
	4	34,34	34,29	34,25	34,29
	6	29,15	29,05	28,97	29,05
	8	27,68	27,62	27,57	27,62
	10	23,39	23,33	23,31	23,34
	12	21,95	21,90	21,88	21,91
	14	20,51	20,48	20,46	20,48
	16	18,60	18,57	18,88	18,68
	20	17,17	17,14	17,12	17,14
	22	16,44	16,43	16,41	16,42
	24	15,96	15,95	15,94	15,95

По результатам испытаний была построена зависимость толщины смазочного слоя от нагрузки (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что с увеличением нагрузки значения толщины смазочного слоя начинают принимать линейную зависимость после $G=10$ кг,

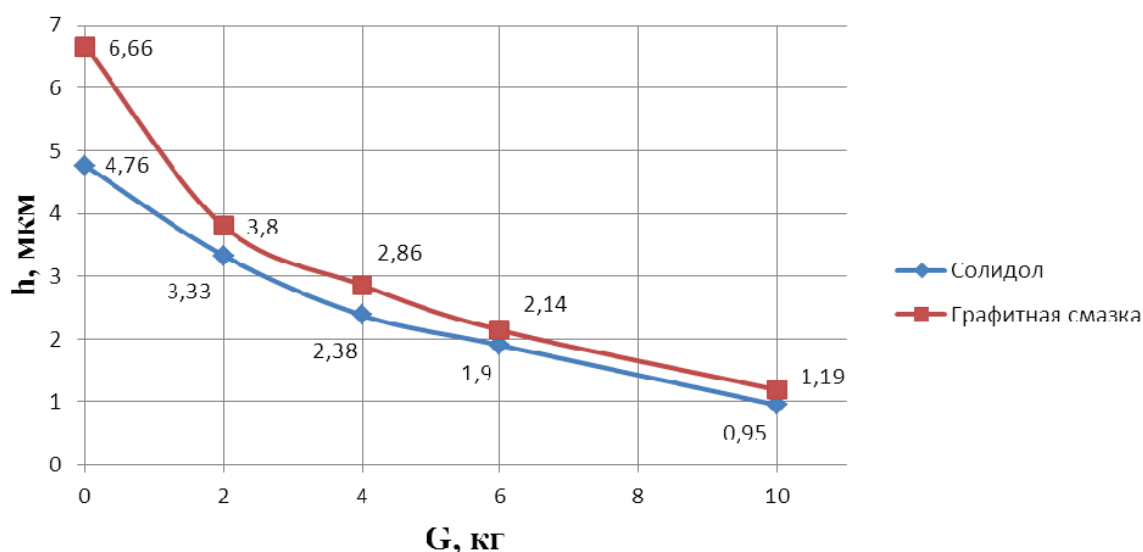


Рис. 2. Результаты испытаний с нагрузкой

Fig. 2. Test results with load

поэтому можно выбрать область, которая будет соответствовать оптимальной нагрузке, и дальнейшие опыты проводить в заданных пределах.

Дальнейшие исследования были направлены на проведение опытов с использованием многофункциональной присадки (МФП-1) на основе соединений серы, применительно к трубной замковой резьбе с целью улучшения смазки Р-416. Для экспрессного метода определения качества использования резьбовых смазок, их сравнения и получения конкретного результата использовалось описанное ранее устройство, позволяющее рассчитать удельную толщину смазывающего слоя (1).

Результаты расчета удельной толщины для различных концентраций присадки МФП-1 приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета удельной толщины смазочного слоя

Table 3. The results of calculating the specific thickness of the lubricating layer

Испытуемый образец Test sample	Процентное содержание МФП-1, % Percentage of MFA-1, %	Удельная толщина смазочного слоя, мкм Specific thickness of the lubricating layer, μm
P-416 R-416	0	3,68
1	2	3,63
2	4	3,26
3	6	3,47
4	8	3,40

Из табл. 3 видно, что содержание 2 % МФП-1 в резьбовой смазке Р-416 является наиболее оптимальным. Удельная толщина смазочного слоя лежит в области кратковременного граничного трения. Для наиболее качественной оценки наших опытов данные образцы были проверены на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 по методике, изложенной в ГОСТ 32501–2013. Данная машина предназначена для обеспечения проведения

испытаний жидких и пластичных смазочных материалов, применяемых с целью определения их триботехнических характеристик. Результаты испытания на ЧМТ-1 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний на ЧМТ-1

Table 4. The results of tests on the head injury

Испытуемый образец Test sample	Критическая нагрузка, Н Critical load, N	Нагрузка сваривания, Н Welding load, N	Индекс задира Bully index	Показания износа, мм Wear indication, mm
P-416 R-416	1100	2800	519	2,0
1	1450	4900	755	1,8
2	1225	4700	1684	2,2
3	1220	4600	1217	1,8
4	1260	5000	760	1,9

Наилучшие показания износа показали первый и третий образец, которые соответствуют 2 и 6 % добавления сернистой присадки в Р-416. В целом по результатам стендовых испытаний видно, что первый образец обладает более высокими триботехническими параметрами, что соответствует нашим лабораторным испытаниям. Дальнейшие исследования планируется направить на оценку исследуемых свойств резьбовых смазочных материалов в их рабочем диапазоне температур.

Выводы и рекомендации

В результате исследовательской работы разработан экспрессный метод оптимального выбора смазочного материала по несущей способности (методика определения толщины граничного слоя методом «стопы»), испытана присадка на основе сернистых соединений, которая в настоящее время не нашла своего применения в буровой технологии.

По результатам испытаний можно сказать, что данная присадка, в определенных пределах соотношения к смазочному материалу, повышает

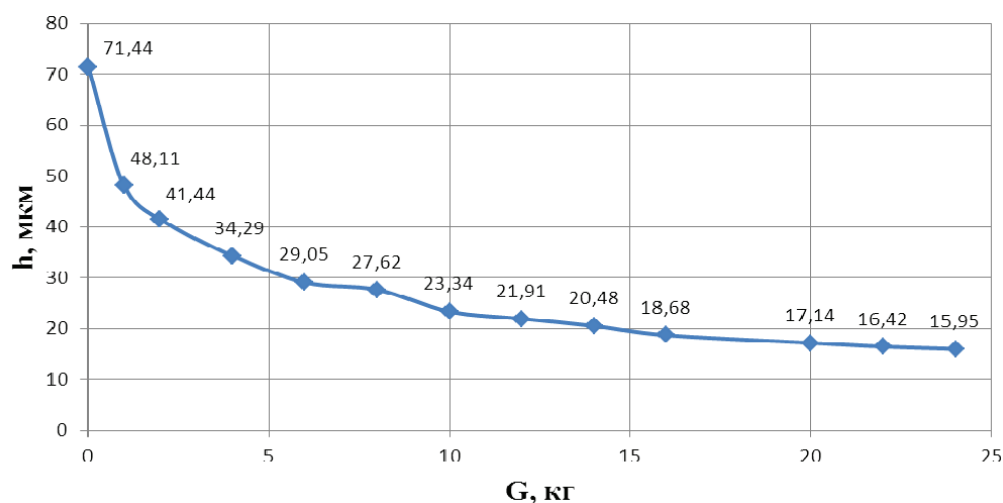


Рис. 3. График зависимости толщины смазочного слоя от нагрузки

Fig. 3. Dependence of the lubricating layer thickness on load

устойчивость к нагрузкам, уменьшает износ трущихся поверхностей и продлевает срок службы элементов трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные тенденции развития смазочных добавок в бурении / Ю.Н. Мойса, Н.В. Фролова, К.С. Бармотин, А.М. Бородин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2007. – № 3. – С. 10–14.
2. Причины и особенности разрушения элементов компоновки буровой колонны в современных условиях геолого-технической эксплуатации / Р.Н. Бахтизин, Н.К. Ценев, Р.А. Исмаков, А.Р. Яхин, М.Н. Назарова // Сервисные услуги в добыче нефти: Материалы II научно-технической конференции. – Уфа, 2015. – С. 25–37.
3. Исследования антикоррозионных свойств смазочных добавок для буровых растворов / В.П. Бондаренко, А.С. Садырбаева, Ж.К. Надинова, А.М. Туребекова, Н.В. Шугаева // Знание. – 2017. – № 1–1 (41). – С. 25–33.
4. Упрочнение поверхностей для повышения ресурса работы буровых труб / А.Р. Яхин, Р.А. Исмаков, Р.Р. Гарифуллин, Ф.Н. Янгиров // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2014. – № 4. URL: http://www.ogbus.ru/issues/4_2014/ogbus_4_2014_p381-399_YakhinAR_ru.pdf (дата обращения: 10.06.2017).
5. Оценка изменения объема изношенного материала в зависимости от подачи смазочного материала / С.И. Платов, Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров, Ю.Х. Гатагулина // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2013. – № 2. – С. 16–18.
6. Маленко П.И., Релмасира К.Д., Леонов А.Ю. Особенности структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях сталей при трении скольжения со смазочным материалом // ПОЛИКОМТРИБ-2015: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель, 2015. – С. 98.
7. Ванин А.В. Влияние пропитки смазочных материалов на триботехнические свойства пористых композиционных материалов // Научный обзор. – 2014. – Т. 4. – № 3. – С. 85–91.
8. Грей Дж.Р., Дарли Г.С. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей). – М.: Недра, 1985. – 124 с.
9. Aston M.S., Hearn P.J., McGhee G. Techniques for Solving Torque and Drag Problems in Today's Drilling Environment // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, 1998. URL: <https://doi.org/10.2118/48939-MS> (дата обращения 29.06.2017).
10. Novel Lubricants for Water-Based Drilling Fluids / F.B. Growcock, T.P. Frederick, A.R. Reece, G.W. Green, M.D. Ruffin // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – Houston, 1999. URL: <https://doi.org/10.2118/50710-MS> (дата обращения 29.06.2017).
11. Bol G.M. Effect of Mud Composition on Wear and Friction of Casing and Tool Joints // SPE Drilling Engineering. – 1986. – V. 1. – Iss. 5. URL: <https://doi.org/10.2118/13457-PA> (дата обращения 29.06.2017).

Рекомендовано применение разработанного устройства для дальнейших исследований свойств смазочных материалов.

12. Янгиров Ф.Н. Улучшение показателей бурения применением новой смазки в резьбовых соединениях бурового инструмента: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 1999. – 196 с.
13. Янгиров Ф.Н., Яхин А.Р., Михеев Л.Д. Совершенствование смазочных добавок к буровым растворам // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4 (106). – С. 21–27.
14. Maidla E.E., Wojtanowicz A.K. Laboratory Study of Borehole Friction Factor with a Dynamic-Filtration Apparatus // SPE Drilling Engineering. – 1990. – V. 5. – Iss. 3. URL: <https://doi.org/10.2118/18558-PA> (дата обращения 29.06.2017).
15. Lammons A.D. Field use documents glass-bead performance // Oil Gas J. – 1984. – V. 82. – № 48. – P. 109–112.
16. Исследование износостойкости замков буровых труб при трении о горную породу в различных средах / А.Р. Яхин, Г.В. Конесев, Ф.Н. Янгиров, А.М. Фролов // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 6. – С. 30–35.
17. Brookey T., Bird J., Garret C. Copolymer Beads Aid Horizontal Drilling Operations by Reducing Sliding Wellbore Friction // 4th International Conference on Horizontal Well Technology. – Houston, 1992. – P. 128–132.
18. Method for the Production of PVC Particles: pat. USA № W01997040076 A1; stated 21.04.1997; publ. 30.10.1997. URL: <http://www.google.ch/patents/WO1997040076A1> (дата обращения 01.07.2017).
19. Захарченко А.В. Толщина смазочного слоя в трибосопряжениях как характеристика параметров процесса // Вестник национального технического университета Харьковский политехнический институт. – 2012. – № 36. – С. 61–69.
20. Field Experience Shows that New Lubricant Reduces Friction and Improves Formation Compatibility and Environmental Impact / W.E. Foxenberg, S.A. Ali, T.P. Long, J. Vian // SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. – Lafayette, 2008. URL: <https://doi.org/10.2118/112483-MS> (дата обращения 29.06.2017).
21. Sönmez A., Kök M.V., Özel R. Performance analysis of drilling fluid liquid lubricants // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2013. – V. 108. – P. 64–73.
22. Knox D., Jiang P. Drilling Further with Water-Based Fluids – Selecting the Right Lubricant // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – The Woodlands, 2005. URL: <https://doi.org/10.2118/92002-MS> (дата обращения 29.06.2017).
23. Рекин С.А. Исследование и разработка методов прогнозирования износа элементов буровых колонн при строительстве скважин: дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа, 2005. – 248 с.
24. Трение, изнашивание и смазка: справочник в 2-х кн. Кн. 2 / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

Поступила 04.10.2017 г.

Информация для авторов

Янгиров Ф.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Яхин А.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Мустафин Т.С., студент магистратуры кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Дихтарь Т.Д., кандидат технических наук, доцент кафедры разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском.

UDC 622.24.063

SUBSTANTIATION OF LUBRICANT SELECTION FOR DRILLING TECHNOLOGY

Farit N. Yangirov¹,
bngs-ufa@mail.ru

Artur R. Yakhin¹,
9406622@mail.ru

Timur S. Mustafin¹,
tumyr-77@mail.ru

Tatiana D. Dikhtyar²,
dihhttd@gmail.com

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Branch of Ufa State Petroleum Technical University in the City of Oktyabrsky,
54, Devonskaya street, Oktyabrsky, 452620, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to increase the effectiveness of lubricating materials used in drilling technology. In general, their application leads to reduction in abrasive and fatigue wear of tool material, and increases the service life of drilling equipment, which is especially important for trouble-free operation and improvement of technical and economic parameters during well drilling.

The aim of the research is to develop a procedure for selecting the optimal lubricant composition to improve the durability and tightness of drilling tool threaded connections by determining the thickness of the boundary layers of various lubricants at the specially designed unit.

Research methods. Laboratory tests of properties (average thickness of lubricant layer, critical load, welding load, load wear index, wear indications) of various lubricating compositions were carried out at the developed test unit and using the four-ball friction machine ChMT-1.

Results. The developed express method of lubricant selection according to load-carrying capacity based on the lubricating layer specific thickness calculation (the «pile» method) allows us to choose the optimum type from the lubricant compositions tested. The authors have determined the optimum percentage of additive content based on sulfur compounds added to improve the P-416 thread lubricant for pipe locking threads. The test unit developed is recommended for further preliminary studies of lubricant properties.

Conclusions and recommendations. The authors have developed the express technique for optimal selection of lubricant according to its carrying capacity (technique of determining lubricant boundary thickness by the «pile» method), tested the MFA based on sulfur compounds. The research results showed that MFA additive in certain limits of the ratio to the lubricant increases the threaded connection susceptibility to loads, decreases rubbing surface wear and extends the service life of frictional elements. The authors recommend to apply the device developed for further studies of lubricant features.

Key words:

Drill string threaded connections, thread lubricants, «pile» method, thickness of lubricating layer, load, tribotechnical parameters, additive.

REFERENCES

1. Moysa Yu.N., Frolova N.V., Barmotin K.S., Borodin A.M. Current trends in development of lubricating additives in drilling. *Construction of oil and gas wells on the land and at sea*, 2007, no. 3, pp. 10–14. In Rus.
2. Bakhtizin R.N., Tsenev N.K., Ismakov R.A., Yakhin A.R., Nazarova M.N. Prichiny i osobennosti razrusheniya elementov komponentov burilnoy kolonny v sovremennykh usloviyakh geologotekhnicheskoy ehkspluatatsii [Causes and peculiarities of destruction of elements of drill string arrangement in modern conditions of geological and technical exploitation]. *Servisnye uslugi v dobyche nefi. Materialy vtoroy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Services in oil production: Proc. of the II scientific and technical conference]. Ufa, UGNTU Publ., 2015. pp. 25–37.
3. Bondarenko V.P., Sadyrbaeva A.S., Nadirova Zh.K., Turebekova A.M., Shugaeva N.V. Issledovaniya antikorroziionnykh svoystv smazochnykh dobavok dlya burovnykh rastvorov [Research of anticorrosive properties of lubricant additives for drilling muds]. *Znanie*, 2017, no. 1–1 (41), pp. 25–33.
4. Yakhin A.R., Ismakov R.A., Garifullin R.R., Yangirov F.N. Hardening surfaces for increasing service life of drill pipes. *Oil and gas business: electron. sci. journal*, 2014, no. 4, pp. 381–399. In Rus. Available at: http://www.ogbus.ru/issues/4_2014/ogbus_4_2014_p381-399_YakhinAR_ru.pdf (accessed at 10 June 2017).
5. Platov S.I., Dema R.R., Amirov R.N., Gatatulina Yu.Kh. Estimation of the change in the volume of worn material, depending on the supply of lubricant. *Mechanical equipment of metallurgical plants*, 2013, no. 2, pp. 16–18. In Rus.
6. Malenko P.I., Relmasira K.D., Leonov A.Yu. Osobennosti strukturno-fazovykh prevrashcheny v poverkhnostnykh sloyakh staley pri trenii skolzheniya so smazochnym materialom [Features of structural-phase transformations in surface layers of steels during sliding friction with a lubricant]. *POLIKOMTRIB-2015: Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [POLIKOMTRIB-2015: Theses of the reports of the international scientific and technical conference]. Gomel, 2015. pp. 98.
7. Vanin A.V. Influence of impregnation of lubricants on tribotechnical properties of porous composite materials. *Scientific review*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 85–91. In Rus.
8. Grey G.R., Darli G.S. *Sostav i svoystva burovnykh agentov (promyvochnykh zhidkostey)*. [Composition and properties of drilling agents (washing liquids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
9. Aston M.S., Hearn P.J., McGhee G. Techniques for Solving Torque and Drag Problems in Today's Drilling Environment. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, 1998.

- Available at: <https://doi.org/10.2118/48939-MS> (accessed 29 June 2017).
10. Growcock F.B., Frederick T.P., Reece A.R., Green G.W., Ruffin M.D. Novel Lubricants for Water-Based Drilling Fluids. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Houston, 1999. Available at: <https://doi.org/10.2118/50710-MS> (accessed 29 June 2017).
 11. Bol G.M. Effect of Mud Composition on Wear and Friction of Casing and Tool Joints. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, Iss. 5. Available at: <https://doi.org/10.2118/13457-PA> (accessed: 29 June 2017).
 12. Yangirov F.N. *Uluchshenie pokazateley bureniya primeneniem novoy smazki v rezbovykh soedineniyakh burilnogo instrumenta*. Dis. Kand. nauk [Improving the drilling performance using a new lubricant in the threaded joints of the drilling tool. Cand. Diss.]. Ufa, 1999. 196 p.
 13. Yangirov F.N., Yakhin A.R., Mikheev L.D. Perfection of lubricant additives to drilling mud. *Problems of gathering, preparation and transport of oil and oil products*, 2016, no. 4 (106), pp. 21–27. In Rus.
 14. Maidla E.E., Wojtanowicz A.K. Laboratory Study of Borehole Friction Factor with a Dynamic-Filtration Apparatus. *SPE Drilling Engineering*, 1990, vol. 5, Iss. 3. Available at: <https://doi.org/10.2118/18558-PA> (accessed: 29 June 2017).
 15. Lammons A.D. Field use documents glass-bead performance. *Oil Gas J.*, 1984, vol. 82, no. 48, pp. 109–112.
 16. Yakhin A.R., Konesev G.V., Yangirov F.N., Frolov A.M. Investigation of the wear resistance of drill pipe locks in friction against rock in various media. *Territory of Neftegaz*, 2014, no. 6, pp. 30–35. In Rus.
 17. Brookey T., Bird J., Garret C. Copolymer Beads Aid Horizontal Drilling Operations by Reducing Sliding Wellbore Friction. *4th International Conference on Horizontal Well Technology*. Houston, 1992. pp. 128–132.
 18. *Method for the Production of PVC Particles*: pat. USA № WO1997040076 A1. Available at: <http://www.google.ch/patents/WO1997040076A1> (accessed: 1 July 2017).
 19. Zakharchenko A.V. The thickness of the lubricating layer in tribo-conjugations as a characteristic of process parameters. *Vestnik of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute*, 2012, no. 36, pp. 61–69. In Rus.
 20. Foxenberg W.E., Ali S.A., Long T.P., Vian J. Field Experience Shows that New Lubricant Reduces Friction and Improves Formation Compatibility and Environmental Impact. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*. Lafayette, 2008. Available at: <https://doi.org/10.2118/112483-MS> (accessed 29 June 2017).
 21. Sönmez A., Kök M.V., Özel R. Performance analysis of drilling fluid liquid lubricants. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 108, pp. 64–73.
 22. Knox D., Jiang P. Drilling Further with Water-Based Fluids – Selecting the Right Lubricant. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. The Woodlands, 2005. Available at: <https://doi.org/10.2118/92002-MS> (accessed: 29 June 2017).
 23. Rekin S.A. *Issledovanie i razrabotka metodov prognozirovaniya iznosa elementov burilnykh i obsadnykh kolonn pri stroitelstve skvazhin*. Dis. Dokt. nauk [Research and development of methods for predicting wear of drilling and casing string elements during well construction. Dr. Diss.]. Ufa, 2005. 248 p.
 24. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik* [Friction, wear and lubrication: a handbook]. Eds. I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 358 p.

Received: 4 October 2017.

Information about the authors

Farit N. Yangirov, Cand. Sc., assistant professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Artur R. Yakhin, Cand. Sc., assistant professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Timur S. Mustafin, Master student, Ufa State Petroleum Technological University.

Tatiana D. Dikhtyar, Cand. Sc., assistant professor, Branch of Ufa State Petroleum Technical University in the City of Oktyabrsky.

УДК 004.93*12

СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Друки Алексей Алексеевич¹,
druki@tpu.ru

Спицын Владимир Григорьевич¹,
spvg@tpu.ru

Болотова Юлия Александровна¹,
julya.bolotova@gmail.com

Башлыков Артём Андреевич¹,
Zagta12345@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методов, алгоритмов и программных средств, обеспечивающих повышение эффективности семантической сегментации данных на снимках дистанционного зондирования Земли. Несмотря на интенсивное развитие современных методов и алгоритмов, зачастую они не обеспечивают требуемое качество работы и надежность, поэтому на сегодняшний день существует потребность в повышении качества семантической сегментации объектов на изображениях.

Цель исследования: разработка алгоритмов, предназначенных для решения задачи семантической сегментации данных на снимках дистанционного зондирования Земли.

Объекты исследования: нейросетевые алгоритмы, обеспечивающие семантическую сегментацию данных на изображениях; методы реализации и обучения искусственных нейронных сетей; алгоритмы обработки изображений.

Методы. Для решения поставленных задач были использованы методы вычислительного интеллекта; методы классификации образов на изображениях; теория искусственных нейронных сетей; методы обучения искусственных нейронных сетей с использованием программного обеспечения Visual Studio; библиотеки глубокого обучения и реализации нейросетевых алгоритмов Caffe.

Результаты. Был произведён обзор методов и алгоритмов, позволяющих осуществлять семантическую сегментацию данных на спутниковых снимках земной поверхности. На основании проведенного анализа был сделан вывод, что для решения поставленной задачи наиболее эффективно использовать нейросетевые алгоритмы. Разработана сверточная нейронная сеть с оригинальной архитектурой, состоящая из шести слоев. Выполнена программная реализация алгоритма, позволяющая строить карту с изображением контуров зданий, дорог и фона, на основе входных данных. Представлено сравнение результатов работы различных алгоритмов обучения для разработанной нейронной сети.

Ключевые слова:

Нейронные сети, семантическая сегментация, классификация образов, обработка изображений, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Семантическая сегментация изображений заключается в выделении на изображении локальных областей (сегментов), соответствующих различным классам объектов. Сегментация снимков дистанционного зондирования Земли находит применение во множестве областей: геоинформатика, инжиниринг георесурсов, автоматическое создание карт местности, градостроительство, анализ землепользования и т. д. Несмотря на интенсивное развитие методов и алгоритмов классификации объектов на изображениях, данная задача до сих пор не решена в полной мере и зачастую некоторые этапы данного процесса выполняются операторами вручную, что приводит к большим временным затратам и снижению эффективности. В процессе выполнения работы человеку свойственно уставать, терять концентрацию и эффективность его работы снижается.

На сегодняшний день существует множество методов и алгоритмов классификации объектов на изображениях, в том числе на снимках земной поверхности, обеспечивающих хорошие результаты работы. Однако данным алгоритмам присущи определенные недостатки, которые более подробно описаны в следующем разделе [1]. Таким образом, на сегодняшний день является актуальной задача разработки методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих автоматизировать данный процесс и повысить эффективность его работы.

В статье представлен обзор существующих методов и алгоритмов, предназначенных для решения задачи семантической сегментации изображений. Представлены достоинства и недостатки существующих алгоритмов. В процессе исследования было выявлено, что одним из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи является применение нейросетевых алгоритмов, а

именно сверточных нейронных сетей, так как они обладают рядом преимуществ: повышенная устойчивость к искажению входных данных; высокая эффективность классификации образов; меньшее количество настраиваемых параметров. На основании этого было принято решение разработать сверточную нейронную сеть для решения задачи семантической сегментации данных на снимках дистанционного зондирования Земли.

Обзор алгоритмов семантической сегментации изображений

Основные подходы к семантической сегментации изображений включают совокупность использования трёх типов алгоритмов: детекторы, дескрипторы и классификаторы, которые определяют основные параметры изображения, выделяют объекты и классифицируют их. В качестве основных параметров изображения могут служить: яркость, цвет, текстура, углы и границы объектов на изображении и тому подобное.

Среди наиболее популярных и эффективных алгоритмов, включающих в себя детекторы и дескрипторы, можно выделить алгоритмы SIFT, SURF, FAST, MSER, HOG [1–6].

Алгоритм SIFT (Scale Invariant Feature Transform) включает в себя детектор и дескриптор. Детектор SIFT основан на использовании масштабируемых пространств – набора всевозможных, сглаженных определённым фильтром версий одного изображения. При использовании гауссового фильтра данное масштабируемое пространство становится инвариантно к сдвигам, вращениям и не смещающему локальные экстремумы масштабу. Определение ключевых точек выполняется по трем параметрам: смещение от точного экстремума при помощи многочлена Тейлора; значение контраста разности гауссианов; нахождение точки на границе объекта при помощи матрицы Гессе. Далее вычисляется ориентация ключевой точки исходя из направления градиентов соседних точек [1, 2].

Работа дескриптора SIFT заключается в определении градиента изображения, его направления и модуля, умноженного на вес, для каждого из четырёх секторов вокруг особой точки. Для каждого сектора составляется гистограмма направлений градиента, каждое вхождение которого взвешено модулем этого градиента.

Алгоритм SURF (Speeded Up Robust Features) является модернизацией детектора SIFT, но вместо функции Гаусса используется её приближение прямоугольным фильтром 9×9 , что ускоряет получение результата алгоритма.

В дескрипторе SURF вокруг точки интереса строится квадратная область и разделяется на квадратные сектора, в которых вычисляются отклики на вейвлеты Хаара, направленные вертикально и горизонтально. Данные отклики взвешиваются и суммируются по каждому из секторов [3].

Алгоритм FAST (Features from Accelerated Segment Test) не требует вычисления производных по яркости, а сравнивается яркость в окрестности от проверяемой точки. Сначала проводится быстрый тест четырёх точек от исследуемой, а затем проверяются остальные. Количество проверок и их последовательность определяются на обучающей выборке [4].

Алгоритм MSER (Maximally Stable Extremal Regions) основан на определении интенсивности пикселей изображения и сравнение их с некоторым порогом (если интенсивность пикселя больше порога, считаем его белым, иначе – чёрным). Таким образом, строится пирамида изображений, в начале которой стоят белые изображения, а в конце – чёрные. Такая пирамида позволяет построить множество связанных компонент интенсивности, которые будут инвариантны к аффинным преобразованиям [5].

Алгоритм HOG (Histogram of Oriented Gradients) – дескриптор ключевых точек, основанный на подсчёте направлений градиента в локальных областях изображения. Изображение разделяется на небольшие связанные области, которые называются ячейками, и для каждой ячейки рассчитывается гистограмма направлений градиентов и направлений краёв для пикселей внутри ячейки. Выходом дескриптора является комбинация этих гистограмм [6].

К достоинствам перечисленных алгоритмов можно отнести высокую устойчивость к различным геометрическим и фотометрическим преобразованиям и изменению масштаба изображения. Недостатком данных алгоритмов является низкая устойчивость работы при изменении углов регистрации, условий освещения и при отражающих поверхностях.

Рассмотрим три класса широко используемых классификаторов: мешок слов, метод опорных векторов и нейронные сети.

Алгоритм мешок слов (Bag of words) относится к числу наиболее распространённых классов алгоритмов классификации изображений [7]. Основные шаги данного алгоритма:

- 1) определить особые (ключевые) точки на изображении;
- 2) построить дескрипторы этих точек;
- 3) провести кластеризацию дескрипторов, принадлежащих к объектам обучающей выборки (то есть заполнить словарь «словами»);
- 4) построить описание каждого изображения в виде нормированной гистограммы встречаемости «слов» (вычисление для каждого из кластеров количества отнесённых к нему особых точек изображения);
- 5) построить классификатор.

Основные недостатки данного классификатора заключаются в большом размере словаря. Также данный алгоритм не учитывает пространственную информацию об объекте, и при наличии схожих особых точек на разных объектах их описания могут совпадать [7].

Метод опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) – один из наиболее популярных методов обучения классификаторов. Идея данного метода заключается в нахождении гиперплоскости для разделения объектов на классы. Для того чтобы гиперплоскость более устойчиво разделяла классы, она должна находиться от точек выборки на максимальном расстоянии. Это достигается, когда норма вектора минимальна. Опорными векторами называются множества, лежащие на границах областей, разделённых гиперплоскостью [8].

К достоинствам данного алгоритма помимо простоты реализации можно отнести возможность применения небольшой обучающей выборки, при этом классификатор может показывать приемлемый результат. Это же является и недостатком – алгоритм использует не всё множество, а лишь небольшую их часть на границах областей.

Искусственные нейронные сети (ИНС) – алгоритмы, моделирующие способ обработки информации человеческого мозга. Представляют из себя распределённый параллельный процессор, состоящий из элементарных частиц обработки информации (нейроны) и связей между ними (синаптические веса), позволяющих накапливать знания из окружающей среды и использовать в процессе обучения [9]. Обработка информации нейроном ведётся посредством умножения всех входных сигналов на соответствующие синаптические связи, их суммирования и обработки функцией активации нейрона, после чего сигнал распространяется дальше по сети. Обучение сети заключается в настройке синаптических весов в зависимости от выхода сети [9].

Основным недостатком классических нейронных сетей для обработки изображений является большой размер входного вектора данных, в следствии этого увеличивается количество нейронов каждого слоя и сеть становится громоздкой и сложной для обучения. Также классические нейронные сети не могут учесть топологию исходного изображения, так как принимают его целиком.

Этих недостатков лишены свёрточные нейронные сети (СНС), которые состоят из специальных свёрточных и подвыборочных слоев. СНС имеют двумерную иерархическую структуру, нейроны сгруппированы в плоскости, а плоскости сгруппированы в слои. От слоя к слою размер плоскостей постепенно уменьшается, таким образом последние слои имеют классический вид многослойного перцептрона.

СНС основаны на принципах локального восприятия и разделяемых весов. Под локальным восприятием подразумевается, что на вход одного нейрона поступают не все выходы предыдущего слоя, а лишь некоторая определённая их часть [10, 11].

Под разделяемыми весами подразумевается, что для большинства связей используется небольшой набор весов, называемых ядрами. Ядро представляет из себя матрицу, которая применяется к вектору данных посредством математической опе-

рации свёртки. Суть этой операции заключается в поэлементном умножении фрагмента изображения на матрицу ядра, суммировании полученных значений и записи результата в аналогичную позицию выходного изображения, которое называется картой признаков. Таким образом, свёрточные нейронные сети обладают гораздо меньшим количеством настраиваемых параметров. Также данный тип нейронных сетей обладает высокой устойчивостью к изменению масштаба, сдвигу и повороту и к другим преобразованиям входных данных [11–13].

Разработка свёрточной нейронной сети

В последние годы СНС показывают высокие результаты при решении задач классификации объектов на изображениях. Эффективность этого подхода объясняется тем, что свёрточные нейронные сети являются гибким инструментом и позволяют адаптировать свою структуру и параметры для решения задачи.

На сегодняшний день не существует четко регламентированных правил реализации структуры СНС: количество и организация слоев, количество и размер карт признаков, размер матриц свёртки, выбор алгоритма обучения. При разработке структуры СНС нужно понимать, что небольшое количество параметров сети может снизить точность классификации. Однако большое количество параметров увеличивает вычислительную сложность сети и не всегда обеспечивает улучшение классифицирующих способностей сети. Таким образом, разработка оптимальной структуры нейронной сети является эмпирическим процессом, который включает в себя большое количество экспериментальных исследований. Основной целью экспериментов являлось построение конфигурации нейронной сети с наименьшим числом параметров.

В процессе проведенных экспериментальных исследований были реализованы СНС различной архитектуры, включающие в себя разное количество параметров. Эксперименты показали, что нейронные сети с упрощенной архитектурой и малым количеством параметров показывали худшие результаты. При последовательном усложнении архитектуры СНС удалось подобрать оптимальную архитектуру, обеспечивающую высокие результаты классификации (рис. 1). Дальнейшие эксперименты по усложнению архитектуры и увеличению количества параметров СНС не обеспечили улучшение качества классификации, но при этом время работы и обучения сети значительно увеличилось.

Данная нейронная сеть состоит из 6 слоев и включает в себя 3 свёрточных слоя, 1 подвыборочный слой и 2 полносвязных слоя. В качестве входных данных используются цветные изображения.

Входной слой имеет размер 64×64 нейрона. Данный слой не выполняет каких-либо преобразований и предназначен лишь для подачи на него входных данных.

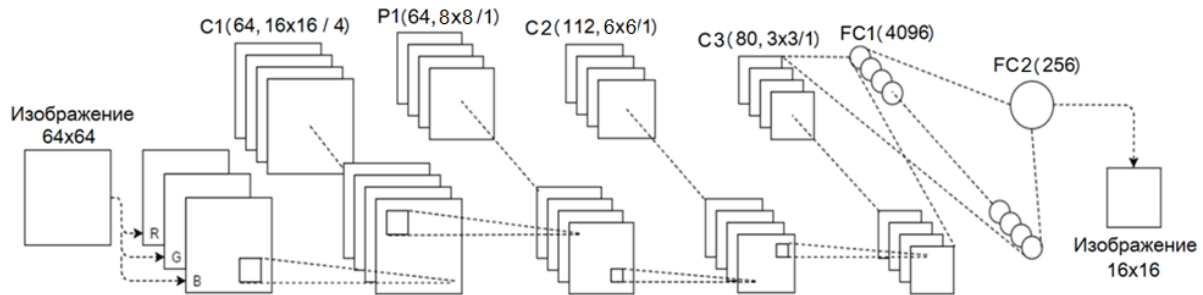


Рис. 1. Архитектура разработанной свёрточной нейронной сети

Fig. 1. Architecture of the developed convolutional neural network

Следом за входным слоем расположен первый скрытый слой C1. Данный слой является свёрточным, содержит 64 карты признаков, каждая из которых имеет размер 16×16 нейронов. Матрица свертки имеет размер 4×4 нейрона. Смещение выполняется на 4 нейрона.

Второй скрытый слой P1 является слоем подвыборки, он состоит 64 карт признаков, каждая из которых имеет размер 8×8 нейронов. Матрица свертки имеет размер 2×2 нейрона. Смещение выполняется на 1 нейрон. Данный слой уменьшает размер предыдущего слоя в два раза.

Третий скрытый слой C2 является свёрточным и состоит из 112 карт признаков, каждая из которых имеет размер 6×6 нейронов. Матрица свертки имеет размер 2×2 нейрона. Смещение выполняется на 1 нейрон.

Четвёртый скрытый слой также является свёрточным и состоит из 80 карт признаков размера 3×3 нейрона. Матрица свертки имеет размер 3×3 нейрона. Смещение выполняется на 1 нейрон.

Пятый скрытый слой FC1 является полносвязным. Данный слой состоит из 4096 нейронов и имеет структуру в виде одномерного вектора.

Шестой скрытый слой FC2 состоит из 256 нейронов и также имеет структуру в виде одномерного вектора.

Первые четыре слоя сети имеют двумерную структуру и предназначены для извлечения признаков на изображении. Последние два слоя имеют структуру одномерного вектора и предназначены для классификации признаков, извлеченных на предыдущих слоях.

На выходе нейронная сеть генерирует вектор из 256 значений, который преобразуется в двумерную матрицу размерами 16×16 пикселей в градациях серого цвета. Значения каждого пикселя выходного изображения находятся в диапазоне от 0 до 255.

Инициализация синаптических коэффициентов сети задавалась случайным образом в диапазоне от 0 до 1.

При разработке структуры нейронной сети также необходимо подобрать функцию активации, которая предназначена для вычисления выходного сигнала искусственного нейрона. Одними из наиболее эффективных функций активации являются

сигмоидальные функции: логистическая и гиперболический тангенс. Данные функции являются похожими в графическом представлении, но имеют различные диапазоны значений [14].

Достоинства сигмоидальных функции заключается в том, что они позволяют усиливать слабые сигналы и не насыщаются при сильных сигналах.

Логистическая функция имеет область значений от 0 до 1 и задается формулой [14]:

$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-s})},$$

где s – сумма входных значений нейрона.

Функция гиперболический тангенс имеет область значений от -1 до 1 и задается формулой [14]:

$$f(x) = a \tanh(bx),$$

где a и b – константы.

Для решения поставленной задачи была выбрана функция гиперболический тангенс, так как она имеет ряд преимуществ, которые заключаются в следующем:

- является симметричной относительно начала координат и обеспечивает более быструю сходимость, по сравнению с логистической функцией;
- имеет простую производную;
- имеет максимум второй производной при $=1$.

Разработка нейронной сети выполнялась на языке программирования C++ при использовании библиотеки глубокого обучения Caffe [15]. Caffe – это библиотека, позволяющая реализовывать алгоритмы глубокого обучения при использовании архитектуры параллельных вычислений Cuda. На сегодняшний день данная библиотека является одним из самых эффективных инструментов реализации СНС и позволяет обрабатывать миллионы изображений в день на одном компьютере. В режиме CPU вычислительные затраты занимают около 20 мс при обработке изображений в пакетном режиме.

Выбор алгоритма обучения

Обучение нейронных сетей заключается в последовательной корректировке синаптических весов между нейронами. Одним из самых распро-

страненных и эффективных алгоритмов обучения для нейронных сетей является алгоритм обратного распространения ошибки [10, 14]. Своё название алгоритм получил благодаря тому, что ошибка, вычисляемая на каждой итерации, распространяется по ИНС от выхода к входу с целью перенастройки синаптических весов. В процессе обучения сети, при подаче входного вектора, выход сети сравнивается с выходом из обучающей выборки, формируя ошибку [14]:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^N (t_{kj} - x_{kj})^2,$$

где t_{kj} – желаемое значение выхода нейрона; x_{kj} – текущее значение выхода нейрона.

Корректировка синаптических весов производится по следующей формуле [14]:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \delta_{kj} x_{ij},$$

где η – коэффициент скорости обучения; x_{ij} – значения входа нейрона; δ_{kj} – ошибка нейрона.

Значение ошибки нейронов сети определяется по формуле [14]:

$$\delta_i^{(q)} = (f_i^{(q)}(S))' \sum_j w_{ij} \delta_j^{(q+1)},$$

где $\delta_i^{(q)}$ – значение ошибки i -го нейрона в слое q ; $\delta_j^{(q+1)}$ – значение ошибки j -го нейрона в слое $q+1$; w_{ij} – вес связи, соединяющей два нейрона; $(f_i^{(q)}(S))'$ – значение производной активационной функции i -го нейрона в слое q .

Достоинствами данного алгоритма обучения являются: простота реализации, возможность использовать множество функций потерь, возможность применения при больших объемах данных. К недостаткам алгоритма можно отнести малую корректировку весов, что ведет к долгому процессу обучения. При этом возникает задача выбора оптимального размера шага. Слишком маленький размер шага приводит к медленной сходимости алгоритма, слишком большой размер шага может привести к потере устойчивости процесса обучения [14].

Для решения данных проблем существуют различные методы оптимизации данного алгоритма. Из множества существующих методов оптимизации для обучения и последующего сравнения их работы были выбраны следующие:

- Nesterov accelerated gradient – метод оптимизации, основанный на идее накопления импульса, т. е. при длительном движении в одном направлении скорость будет сохраняться некоторое время. Для этого необходимо сохранять несколько предыдущих значений параметров и вычислять среднее значение, что занимает слишком много памяти [16].
- AdaGrad (Adaptive gradient) – алгоритм оптимизации, принцип которого заключается в сохранении частоты изменения градиента. Идея заключается в сохранении суммы квадратов обновлений для каждого параметра сети. На основе этой величины регулируются обновления па-

раметров – часто встречаемые обновляются реже, освобождая место для редко встречаемых, тем самым обеспечивается адаптивная скорость обучения сети [17].

- Adam (Adaptive moment estimation) – алгоритм оптимизации, сочетающий в себе принципы накопления импульса и сохранения частоты изменения градиента. Данный метод обладает преимуществами обоих рассмотренных выше методов [18].

Обучение и тестирование разработанного алгоритма

Для обучения и тестирования разработанной СНС использовалась база изображений, состоящая из нескольких тысяч спутниковых снимков штата Массачусетс (США) [19]. Размер каждого изображения 1500×1500 пикселей, с разрешением $1 \text{ м}^2/\text{пиксель}$. Среди изображений присутствуют спутниковые снимки (рис. 2) и соответствующие им карты сегментированных объектов (рис. 3). Все изображения сгруппированы на обучающую, тестовую и валидационную выборки в соотношении 0.7/0.2/0.1.

Как видно на рис. 2, изображения содержат различные классы объектов. Основные объекты, которые представляют интерес для поставленной задачи: здания, дороги и фон.

На рис. 3 представлены изображения (карты) сегментированных объектов. Данные изображения соответствуют исходным изображениям из обучающей выборки и предназначены для обучения СНС.

В процессе работы СНС обрабатывает небольшие участки входных изображений в соответствии с размером входного слоя (64×64 пикселя). Таким образом, происходит последовательное сканирование входного изображения окном размером 64×64 пикселя. В каждом местоположении данного окна нейронная сеть выполняет сегментацию признаков изображения, формируя на выходе карту размером 16×16 пикселей. Такая разница в размерах обусловлена тем, что при выборке небольшого участка изображения зачастую тяжело узнать, что на нём изображено (рис. 4). Увеличенный размер входного участка изображения позволяет сохранить часть данных для более эффективной классификации (рис. 4).

Для того чтобы избежать проблемы переобучения, в пятом полносвязном слое реализован метод *DropOut* [20], который заключается в том, что во время обучения из общей сети многократно и случайным образом выделяется некоторая подсеть и обновление весов происходит только в рамках этой подсети. Нейроны попадают в подсеть с вероятностью 0,5.

С целью регуляризации сети использовалась L2 регуляризация, которая заключается в большом штрафе слишком высокого значения веса и малом при низком значении, что выражается в использовании коэффициента регуляризации. Также при обучении выполнялась минимизация функции потерь при помощи метода Mini-batch градиентного спуска [20].



Рис. 2. Снимки дистанционного зондирования Земли

Fig. 2. Images of Earth remote sensing

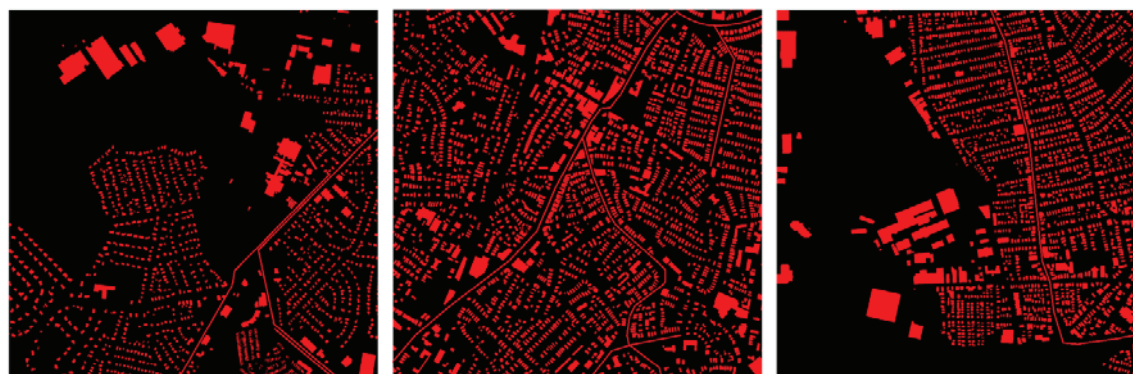


Рис. 3. Карты сегментированных объектов

Fig. 3. Maps of segmented objects

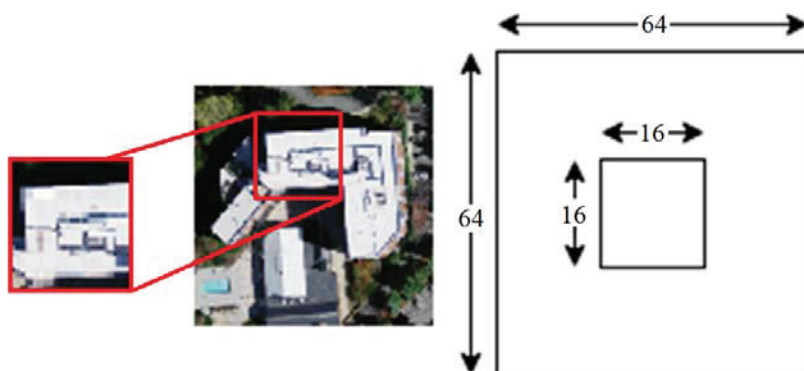


Рис. 4. Размеры входного и выходного изображения

Fig. 4. Sizes of input and output images

Для увеличения обучающей выборки и повышения инвариантности сети к различным поворотам и смене ракурса исходные изображения поворачивались на случайный угол.

При обучении и тестировании применялись следующие параметры нейронной сети:

- коэффициент обучения 0,0005;
- частота изменения коэффициента обучения 10^4 ;
- величина изменения коэффициента обучения 0,1;
- затухание для регуляризации L2 0,0005.

Все эксперименты проводились на следующем оборудовании: процессор Intel Core i5–4690k (4GHz), ОЗУ 8ГБ, видеокарта NVIDIA Quadro FX 4800.

Для обучения разработанной СНС исследовалась работа трех алгоритмов, которые более подробно описаны в предыдущем разделе: Nesterov accelerated gradient, AdaGrad и Adam. Конфигурация сети оставалась неизменной. Количество эпох обучения для каждого случая составило 400. В табл. 1 представлены результаты обучения.

Таблица 1. Результаты обучения СНС

Table 1. Results of convolution neural network (CNN) training

Название алгоритма Name of algorithm	Время обучения Time of training		Точность Accuracy, %
	ч/ч	мин/мин	
Nesterov accelerated gradient [16]	10	46	78,13
AdaGrad [17]		27	77,97
Adam [18]		24	85,31

Из результатов, представленных в табл. 1, видно, что алгоритм обучения Adam даёт лучшие результаты относительно остальных. Время обучения составило 10 ч 24 мин, точность классификации 85,31 %. Под точностью понимается совпадение пикселей выхода сети с соответствующими на тестовой выборке.

На рис. 5 представлены результаты сегментации изображения сверточной нейронной сетью. Слева

представлено исходное изображение (рис. 5, а), справа – результат сегментации (рис. 5, б).

Как видно из рис. 5, СНС обеспечивает достаточно высокую эффективность сегментации. Практически все здания на снимке были точно выделены, однако присутствуют погрешности при выделении дорог. В основном это связано с тем, что в некоторых областях изображения дороги имеют слабый контраст по отношению к остальному фону и плохо различимы. Таким образом, в дальнейшем планируется проведение экспериментов с применением алгоритмов по улучшению качества изображений, улучшению контраста и применение различных фильтров.

Сравнение с существующими аналогами

Результаты работы предложенной СНС были сопоставлены с результатами работы алгоритмов Inria2 и TeraDeep [21]. Данные алгоритмы являются закрытыми, поэтому не представлялось возможным реализовать их и протестировать. Результаты их работы взяты из открытых источников. В табл. 2 представлено сравнение результатов сегментации разработанной СНС с аналогами.

Таблица 2. Сравнение результатов работы СНС с аналогами

Table 2. Comparison of the neural network performance with the analogues

Название алгоритма Name of algorithm	Точность Accuracy, %
Разработанная СНС Developed neural network	85,31
Inria2	93,93
TeraDeep	94,41

Как видно из табл. 2, разработанная СНС уступает по точности сегментации алгоритмам Inria2 и TeraDeep, но тем не менее показывает хорошие результаты на уровне 85,31 %. Как уже было сказано выше, данные алгоритмы являются закрытыми, поэтому сложно сделать однозначные выводы о их достоинствах и причинах эффективности.



Рис. 5. Результаты работы СНС: а) исходное изображение; б) результат сегментации

Fig. 5. Results of the CNN: a) original image; б) segmentation result

В будущем планируется оптимизация структуры СНС, применение новых подходов к обучению, а также расширение обучающей выборки с целью получения лучших результатов сегментации.

Заключение

В процессе выполнения работы была реализована СНС для решения задачи семантической сегментации снимков дистанционного зондирования Земли. Были проведены эксперименты по выбору алгоритма обучения – лучшие результаты были получены с помощью алгоритма Adam.

Сравнение в другими методами показало, что разработанная сверточная нейронная сеть уступает некоторым аналогам, но, тем не менее, выполняет поставленную задачу с достаточно высоким результатом. Разработанная нейронная сеть выполняет семантическую сегментацию для трех классов объектов: здания, дороги и фон.

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00977 А "Создание интеллектуальной системы детектирования, распознавания и понимания искаженных печатных текстов на изображениях и видео».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивашечкин А.П., Василенко А.Ю., Гончаров Б.Д. Методы нахождения особых точек изображения и их дескрипторов // Молодой ученый. – 2016. – № 15. – С. 138–140.
2. Park S., Yoo J.H. Real-time face recognition with SIFT based local feature points for mobile devices // The 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS 13). – Malaysia, 2013. – P. 304–308.
3. Tawfiq A., Ahmed J. Object detection and recognition by using enhanced Speeded Up Robust Feature // International Journal of Computer Science and Network Security. – 2016. – V.16. – № 4. – P. 66–71.
4. Tore V., Chawan P.M. FAST Clustering Based Feature Subset Selection Algorithm for High Dimensional Data // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2016. – V. 5. – № 7. – P. 234–238.
5. Mammeri A., Boukerche A., Khiari E. MSER-based text detection and communication algorithm for autonomous vehicles // IEEE Symposium of Computers and Communication. – Messina, Italy, 2016. – P. 456–460.
6. Dalal N., Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – San Diego, USA, 2005. – V. 1. – P. 886–893.
7. Mohey D.E. Enhancement Bag-of-Words Model for Solving the Challenges of Sentiment Analysis // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2016. – V. 7. – № 1. – P. 244–251.
8. Kecman V., Melki G. Fast online algorithms for Support Vector Machines // IEEE South East Conference (SoutheastCon 2016). – Virginia, USA, 2016. – P. 26–31.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд. – М.: Изд-во «Вильямс», 2006. – 1104 с.
10. Efficient BackProp / Y. LeCun, L. Bottou, G.B. Orr, K.R. Muller // Neural Networks: Tricks of the trade. – Berlin: Springer, 1998. – 44 p.
11. Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI). – 2015. – V. 4. – P. 534–542.
12. Howard A.G. Some Improvements on Deep Convolutional Neural Network Based Image Classification // International Conference on Learning Representations (ICLR). – Banff, Canada, 2014. – V. 10. – № 4. – P. 652–659.
13. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS). – Nevada, USA, 2012. – P. 27–35.
14. Спицын В.Г., Цой Ю.Р. Применение искусственных нейронных сетей для обработки информации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 32 с.
15. Caffe deep learning framework. URL: <http://caffe.berkeleyvision.org> (дата обращения: 20.10.2017).
16. Botev A., Lever G., Barber D. Nesterov's Accelerated Gradient and Momentum as approximations to Regularised Update Descent // Machine Learning. – 2016. – V. 1. – P. 1–7.
17. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – V. 12. – P. 1–39.
18. Diederik P.K., Ba J. Adam: a Method for Stochastic Optimization // The 3rd International Conference for Learning Representations. – San Diego, USA, 2015. – P. 1–15.
19. Road and building detection datasets. URL: <http://www.cs.toronto.edu/~vmnih/data> (дата обращения: 20.10.2017).
20. Dropout: a Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – V. 15. – P. 1929–1958.
21. TeraDeep. URL: <https://www.teradeep.com> (дата обращения: 20.10.2017).

Поступила 13.12.2017 г.

Информация об авторах

Друки А.А., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Спицын В.Г., доктор технических наук, профессор Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Болотова Ю.А., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Башлыков А.А., студент Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 004.93'12

SEMANTIC SEGMENTATION OF EARTH SCANNING IMAGES USING NEURAL NETWORK ALGORITHMS

Alexey A. Druki¹,

druki@tpu.ru

Vladimir V. Spitsyn¹,

druki@tpu.ru

Yulia A. Bolotova¹,

druki@tpu.ru

Artyom A. Bashlykov¹,

Zagta12345@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop methods, algorithms and software to improve the effectiveness of semantic segmentation of the Earth scanning images. Today there is a need to improve the quality of semantic segmentation of objects in images, despite the intensive development of modern methods and algorithms, often they do not provide the required quality of work and reliability.

The main aim of the research is to develop the algorithms to solve the problem of semantic segmentation of the Earth scanning images.

Objects: neural network algorithms which provide semantic segmentation of images; methods of implementation and training of artificial neural networks; image processing algorithms.

Methods. To solve the tasks, the authors have used the methods of computational Intelligence; methods of pattern classification on images; theory of artificial neural networks; methods for training of artificial neural networks using Visual Studio software; deep learning framework Caffe for implementation of neural network algorithms.

Results. The authors made a review of methods and algorithms which allow carrying out semantic segmentation of images. Based on the analysis, it was concluded that neural network algorithms provide more efficient results. The authors developed the convolutional neural network with the original architecture consisting of six layers. Software implementation of the described algorithms is implemented. It allows building a map of segmented buildings, roads and background based on input data. The paper introduces the comparison of results of using different learning algorithms for the developed neural network.

Key words:

Neural networks, semantic segmentation, pattern classification, image processing, remote scanning of the Earth.

The research was carried out within the TPU Competitiveness Enhancement Program. It was financially supported by the RFBR within the project no. 18-08-00977A «Development of the intelligent system of detecting, recognizing and understanding corrupted printed texts in the pictures and video».

REFERENCES

1. Ivashechkin A.P., Vasilenko A.Yu., Goncharov B.D. Methods of finding the singular points on image and their descriptors. *Young scientist*, 2016, no. 15, pp. 138–140. In Rus.
2. Park S., Yoo J.H. Real-time face recognition with SIFT based local feature points for mobile devices. *The 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation (AIMS 13)*. Malaysia, 2013. pp. 304–308.
3. Tawfiq A., Ahmed J. Object detection and recognition by using enhanced Speeded Up Robust Feature. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 66–71.
4. Tore V., Chawan P.M. FAST Clustering Based Feature Subset Selection Algorithm for High Dimensional Data. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2016, vol. 5, no. 7, pp. 234–238.
5. Mammeri A., Boukerche A., Khiari E. MSER-based text detection and communication algorithm for autonomous vehicles. *IEEE Symposium of Computers and Communication*. Messina, Italy, 2016. pp. 456–460.
6. Dalal N., Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. San Diego, USA, 2005. Vol. 1, pp. 886–893.
7. Mohey D.E. Enhancement Bag-of-Words Model for Solving the Challenges of Sentiment Analysis. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 244–251.
8. Kecman V., Melki G. Fast online algorithms for Support Vector Machines. *IEEE South East Conference (SoutheastCon 2016)*. Virginia, USA, 2016. pp. 26–31.
9. Haykin S. *Neyronnye seti: polny kurs* [Neural networks: full course]. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p.
10. LeCun Y., Bottou L., Orr G.B., Muller K.R. Efficient BackProp. *Neural Networks: Tricks of the trade*. Berlin, Springer, 1998. 44 p.
11. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 2015, vol. 4, pp. 534–542.
12. Howard A.G. Some Improvements on Deep Convolutional Neural Network Based Image Classification. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. Banff, Canada, 2014. Vol. 10, no. 4, pp. 652–659.

13. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*. Nevada, USA, 2012. pp. 27–35.
14. Spitsyn V.G., Tsoy Yu.R. *Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey dlya obrabotki informatsii* [Application of artificial neural networks for information processing]. Tomsk, TPU Publ. house, 2007. 32 p.
15. *Caffe deep learning framework*. Available at: <http://caffe.berkeleyvision.org> (accessed 20 October 2017).
16. Botev A., Lever G., Barber D. Nesterov's Accelerated Gradient and Momentum as approximations to Regularised Update Descent. *Machine Learning*, 2016, vol. 1, pp. 1–7.
17. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 1–39.
18. Diederik P.K., Ba J. Adam: a Method for Stochastic Optimization. *The 3rd International Conference for Learning Representations*. San Diego, USA, 2015. pp. 1–15.
19. *Road and building detection datasets*. Available at: <http://www.cs.toronto.edu/~vmnih/data> (accessed 20 October 2017).
20. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, vol. 15, pp. 1929–1958.
21. *TeraDeep*. Available at: <https://www.teradeep.com> (accessed 20 October 2017).

Received: 13 December 2017.

Information about the authors

Alexey A. Druki, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Polytechnic University.

Vladimir V. Spitsyn, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yulia A. Bolotova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artyom A. Bashlykov, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9

ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ МАССИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ FM 12 SYNOP И METAR В СИСТЕМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Карамов Дмитрий Николаевич^{1,2},
dmitriy.karamov@mail.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность работы обусловлена отсутствием единой концепции учета природно-климатической обстановки в системных исследованиях в энергетике.

Цель работы: продемонстрировать возможность использования многолетних метеорологических рядов с международными кодами FM 12 Synop и METAR, зафиксированных на ближайшей от рассматриваемого объекта метеостанции, для воспроизведения природно-климатической обстановки с фиксированным расчетным шагом на протяжении всего цикла расчетного периода; показать значимость многолетних метеорологических рядов при решении глобальной задачи оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии с применением хронологического метода расчета системы.

Методы исследования. Представленная концепция последовательно выстроена на основополагающих положениях теории системных и междисциплинарных исследований с привязкой к апробированным математическим моделям, позволяющим как обрабатывать, так и моделировать природно-климатические показатели с фиксированным дискретным шагом. В работе использованы многолетние метеорологические ряды с международными кодами FM 12 Synop и METAR, зафиксированные на различных метеостанциях Республики Якутия и штата Аляска. Применяется высокоуровневый язык программирования Matlab.

Результаты. Предложена единая концепция воспроизведения актинометрических и ветроэнергетических показателей, а также многих других природно-климатических параметров, имеющих непосредственную связь с задачами системного характера в энергетике. Данная концепция реализована в программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации» с применением высокоуровневого языка программирования Matlab. Представлены результаты обработки многолетних массивов параметров окружающей среды для 22 населенных пунктов, расположенных в различных природно-климатических зонах Республики Якутия и американского штата Аляска. Проведен детальный анализ полученных результатов с соответствующими выводами, визуализацией и заключениями о степени их достоверности и возможности использования в оптимизационных исследованиях автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии с применением хронологического метода расчета системы.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, ветроэнергетический потенциал, метеорологические ряды, системные исследования, оптимизация состава оборудования, хронологический метод.

«Системные исследования в энергетике особенно продуктивны, потому что развитие энергетики в направлении системности уже давно превратилось в объективную необходимость»

академик Лев Александрович Мелентьев, 1983.

Введение

Современные исследования в энергетике являются сложными многогранными задачами, которые имеют множественные связи с различными областями деятельности человека и окружающего мира [1]. Системный подход как направление методологии научного познания позволяет рассматривать различные задачи как целостный комплекс взаимосвязанных элементов [2]. При этом каждый элемент в системе может быть описан различными способами: сложными и упрощенными математическими моделями, статистикой, базами данных и другими формами представления информации [3].

Зачастую системные исследования в энергетике имеют непростые взаимосвязи с множеством других направлений науки, такими как экономи-

ка, демография, климатология, экология и т. д. [4–7]. При этом одним из главных условий является высокий уровень детализации при описании как отдельных элементов и взаимосвязей системы, так и всей системы в целом [8, 9]. Такие положения являются основополагающими при решении сложных научно-технических задач системного характера в энергетике.

В течении последних 20 лет мировое развитие энергетики связано с экологически чистыми источниками энергии, такими как энергия ветра и Солнца, микро гидрогенерация, газификация отходов, биотопливо и т. д. [10–17]. По различным оценкам к 2030 г. доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общемировой генерации будет составлять от 30 до 40 % [18, 19]. При этом глав-

ным фактором, стимулирующим подобный сценарий развития, является повышение средней температуры поверхности Земли, вызванное ростом концентрации CO_2 в атмосфере [20].

Подобные вызовы побуждают мировое сообщество к созданию глобальной дорожной карты, включающей международные соглашения об охране окружающей среды, инвестиционные программы, нормативно-правовые акты, стимулирующие развитие экологически чистой энергетики во всем мире. «Киотский протокол» и спустя 20 лет «Парижское соглашение» являются главными катализаторами развития ВИЭ в мире [21, 22]. Кроме того, в различных регионах мира разрабатываются собственные программы, содействующие развитию ВИЭ: зеленые сертификаты, бесплатное подключение к энергетической системе, гарантированная цена и покупка произведенной энергии, налоговые льготы и разные другие преференции [23–26]. Подобные процессы создают благоприятную инвестиционную обстановку развития ВИЭ как в централизованных, так и автономных системах энергоснабжения.

Большое внимание уделяют применению ВИЭ в сельских территориях развивающихся стран, где энергоснабжение непостоянно. При этом доступная энергия значительно улучшает уровень жизни граждан, решает ряд значимых задач социально-экономического характера, уменьшает миграцию в большие города и улучшает экологическую обстановку в регионе [27–31].

Экономическая эффективность использования ВИЭ в автономных системах энергоснабжения достигается за счет замещения доли органического топлива экологически чистой энергией [32–35]. При этом значительная эффективность ВИЭ наблюдается в микросистемах с установленной мощностью генераторов до 100 кВт [36]. Как правило, в системах данного уровня генераторами являются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и ветроэнергетические установки (ВЭУ), которые имеют стохастический характер производства энергии [37]. В таких условиях обоснованно использование аккумуляторных батарей (АБ), выступающих в роли стабилизирующего элемента системы, работающего в буферном режиме [38–43].

Главной задачей, возникающей при использовании ВИЭ и АБ в автономных системах энергоснабжения, является оптимизация [44–51]. Решение задачи оптимизации позволяет определить следующее: оптимальную технологию производства и аккумулирования энергии; оптимальные значения установленной мощности ВИЭ; экономическую и экологическую эффективность и т. д. При этом одним из важных факторов, существенно влияющих на результат оптимизации, является анализ потенциала ВИЭ [52–54].

Обзор подходов к определению потенциала ВИЭ

Потенциал ВИЭ характеризуется количеством суммарной солнечной радиации, поступающей на

рассматриваемую территорию и скоростью ветра. Анализ данных показателей можно выполнять различными способами.

- К примеру, использовать реальные измерения солнечной радиации и скорости ветра, выполненные на метеостанции [42, 55–61]. Период измерений может варьироваться от одного года до двадцати лет [62]. Такой подход позволяет максимально точно описывать поведение параметров на рассматриваемой территории.
- Также возможно использование среднесуточной солнечной радиации и скорости ветра, поступающих на рассматриваемую территорию по месяцам года. В таком случае определяется среднемесячное количество солнечных/пасмурных дней и количество часов солнечного сияния. Большую популярность при таком подходе получили открытые базы данных NASA SSE [63] и *National Renewable Energy Limited – Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL-SWERA)* [64], позволяющие получить необходимую первоначальную информацию для различных территорий [10, 65–72].
- Особое внимание уделяется программно-вычислительным комплексам (ПВК), позволяющим моделировать солнечную радиацию и скорость ветра. К примеру, ПВК «ARENA», имеющий большую библиотеку распределений, таких как нормальное, логнормальное, бета, Вейбулла, Рэлея, Симпсона, Эрланга и др., позволяет по уже измеренным данным получить массив почасового распределения солнечной радиации. Встроенные алгоритмы ПВК «ARENA» дают возможность использовать различные сочетания представленных распределений. Подобные положения справедливы и для моделирования скорости ветра [73–78]. Часто при анализе скорости ветра и солнечной радиации используется ПВК *Transient System Simulation Tool – «TRNSYS»*, имеющего прямую связь с открытыми источниками [79–81]. Также популярны ПВК «OpenFOAM» и «Fluent» позволяющие моделировать только солнечную радиацию [82, 83]. Отдельно из общего числа выделяется сервис-репозиторий коллективной помощи *GitHub*, имеющий открытые библиотеки, в которых содержатся уже готовые решения для моделирования и анализа как солнечной радиации, так и скорости ветра [84]. При этом данные модели могут быть реализованы с использованием различных языков программирования и находятся в открытом доступе [85]. Следует подчеркнуть, что многие из представленных ПВК и открытых библиотек используют классические подходы для моделирования скорости ветра и солнечной радиации, которые к настоящему времени изучены в достаточно полном объеме.
- К наиболее распространенным математическим моделям солнечной радиации относятся: *P.I. Cooper, R.E. Schulze, M.A. Atwater, M. Iqbal,*

R.E. Bird, ASHRAE и многих других [86–91]. При этом данные модели позволяют воспроизводить актинометрические процессы для условий ясного неба (*Clear sky radiation model*). Следовательно, следующим этапом при моделировании солнечной радиации является учет фактической облачности на рассматриваемой территории. Как уже отмечалось облачность может быть представлена количеством солнечных и пасмурных дней по месяцам года либо реальными многолетними массивами параметров окружающей среды. Данные показатели выступают в качестве входных параметров при определении коэффициентов ослабления как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. В качестве общеизвестных моделей учета облачности на рассматриваемой территории можно выделить следующие: *B. Haurwitz, M.A. Atwater, W.A. Schertzer, F. Kasten-G. Czeplak* и других [92, 93]. Следует обратить внимание на то, что возможны различные сочетания представленных моделей [89]. Эти сочетания в первую очередь зависят от уровня детализации первоначальной информации, её соответствующей обработки и т. д.

При моделировании скорости ветра, как уже отмечалось, наибольшую популярность получили различные распределения и их модификации, построенные на основании среднемесячных значений скорости ветра на рассматриваемой территории. Помимо уже представленных выше распределений, которые к настоящему времени считаются классическими подходами, большое распространение и популярность при моделировании скорости ветра получили *искусственные нейронные сети* (*artificial neural network*) [94, 95].

Недостатки существующих часто используемых подходов

Как видно, к настоящему времени известны различные способы моделирования и анализа как фотоэлектрического, так и ветроэнергетического потенциала рассматриваемой территории. Недостаточное внимание уделяется возможности применения данных способов в системных энергетических исследованиях с ВИЭ и АБ.

К примеру, стоит упомянуть, что среднеквадратичное отклонение для суммарной, прямой, рассеянной солнечной радиации, взятой из *NASA SSE* для территорий, находящихся от 60° до 90° северной широты, имеет значения 34,37, 54,14 и 33,12 % [89]. Более детально с проблематикой использования открытой базы данных *NASA SSE* для территории России можно ознакомиться в [89]. В то же время использование сервиса *NREL-SWERA* оправдано для территории США (за исключением штата Аляска), латинской Америки, части юго-восточной Азии и отдельных стран Ближнего Востока. При этом сервис *NREL-SWERA* для оставшихся территорий мира выводит данные солнечной радиации и скорости ветра, взятые из

открытой базы данных *NASA SSE*. К примеру, в атласе возобновляемой энергетики штата Аляска данные о ветроэнергетическом потенциале взяты из сервиса *NREL-SWERA*, а актинометрические показатели – из *NASA SSE* [96].

Особое внимание следует уделить ПВК, использующим данные типичного метеорологического года (*typical meteorological year – TMY*) [97]. К таким ПВК относятся уже отмеченный «*TRNSYS*» и «*PVSyst*» [98]. Использование такого подхода при решении задачи оптимизации систем с ВИЭ и АБ является малоприменимым, так как он не учитывает изменчивость основных метеорологических параметров исходя из года, месяца, дня и часа расчетного периода. Более того, такой подход не позволяет в полном объеме рассмотреть задачу работоспособности системы с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений как по отдельным элементам системы, так и всей системы в целом.

Популярная математическая модель солнечной радиации *ASHRAE*, реализованная в рамках ПВК «*OpenFOAM*» и «*Fluent*», не учитывает изменение альбедо земной поверхности, альбедо облаков, изменение толщины озонового слоя, наличия аэрозолей, Релеевского рассеивания, циклические отражения солнечной радиации между поверхностью Земли и нижними слоями атмосферы после её первого прохождения [91]. При этом, согласно [91], отсутствие учета вышеописанных показателей в рамках модели *ASHRAE* не приводит к серьезным последствиям. Однако отсутствие учета вышеуказанных показателей приводит к наименее точному учету рассеянной солнечной радиации (и как следствие суммарной) на рассматриваемой территории. Стоит отметить, что для более точного результата анализа фотоэлектрического потенциала территорий с умеренно-континентальным, резко-континентальным и субарктическим климатом, где альбедо земной поверхности в течение года изменяется от 0,15 в летний до 0,75–0,8 в зимний период, необходимо производить расчеты, относительно рассматриваемого дискретного шага (месяц, день, час) расчетного периода.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при анализе фотоэлектрического и ветроэнергетического потенциалов нет единой концепции, отвечающей необходимым требованиям при решении различных задач системного характера в энергетике. Особенно ярко это выражается в задачах оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ и АБ с применением *хронологического метода* моделирования системы, который по мнению многих исследовательских коллективов является одним из самых эффективных способов решения подобного рода задач [16–17, 32–33, 76, 99]. Однако важной составляющей при использовании данного метода является учет изменчивости природно-климатических показателей по годам расчетного периода, который, как правило, составляет до 20 лет (175200 часов). Подобные условия, возникающие в

системных исследованиях в энергетике, стимулируют развитие существующих подходов, а также создают благоприятную обстановку к созданию новых концепций анализа параметров окружающей среды, опирающихся на многолетние метеорологические ряды, находящиеся в открытом доступе.

При этом использование данных, полученных в рамках единой концепции воспроизведения не только ветроэнергетических и фотоэлектрических потенциалов, а в целом природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории, позволяет решать поставленную задачу на более высоком уровне, что значительно увеличивает требования к математическим моделям как отдельных связей и элементов рассматриваемой системы, так и всей системы в целом.

Базисные положения предлагаемой концепции

Предлагаемая, в рамках данной статьи, концепция не ограничивается определением фотоэлектрического и ветроэнергетического потенциалов, отвечающих за возможную генерацию ВЭУ и ФЭП, а направлена на максимально детализированное воспроизведение природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории. Предполагается, что полученные, с использованием

данной концепции, результаты будут интегрироваться в системные энергетические исследования. На рис. 1. показаны сопутствующие задачи, имеющие ярко выраженную связь с природно-климатическими показателями при оптимизационных исследованиях автономных энергетических комплексов, использующих ВИЭ и АБ.

Также в рамках предлагаемой концепции подразумевается использование многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе, использующих международные метеорологические коды *FM 12 Synop* или *METeoro logical Aerodrome Report (METAR)*. Стоит отметить, что даже для самых удаленных населенных пунктов (н.п.) России количество лет метеонаблюдений составляет не менее 8. При этом данные массивы выполнены на основании *срочных измерений* (каждые 3 часа).

Главным свойством предлагаемой концепции является полное сочетание *хронологического метода* расчета системы при решении глобальной задачи оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ и АБ с многолетними метеорологическими рядами, которые в своей природе учитывают последовательность смены метеопараметров. Более того, так как все метеорологические параме-

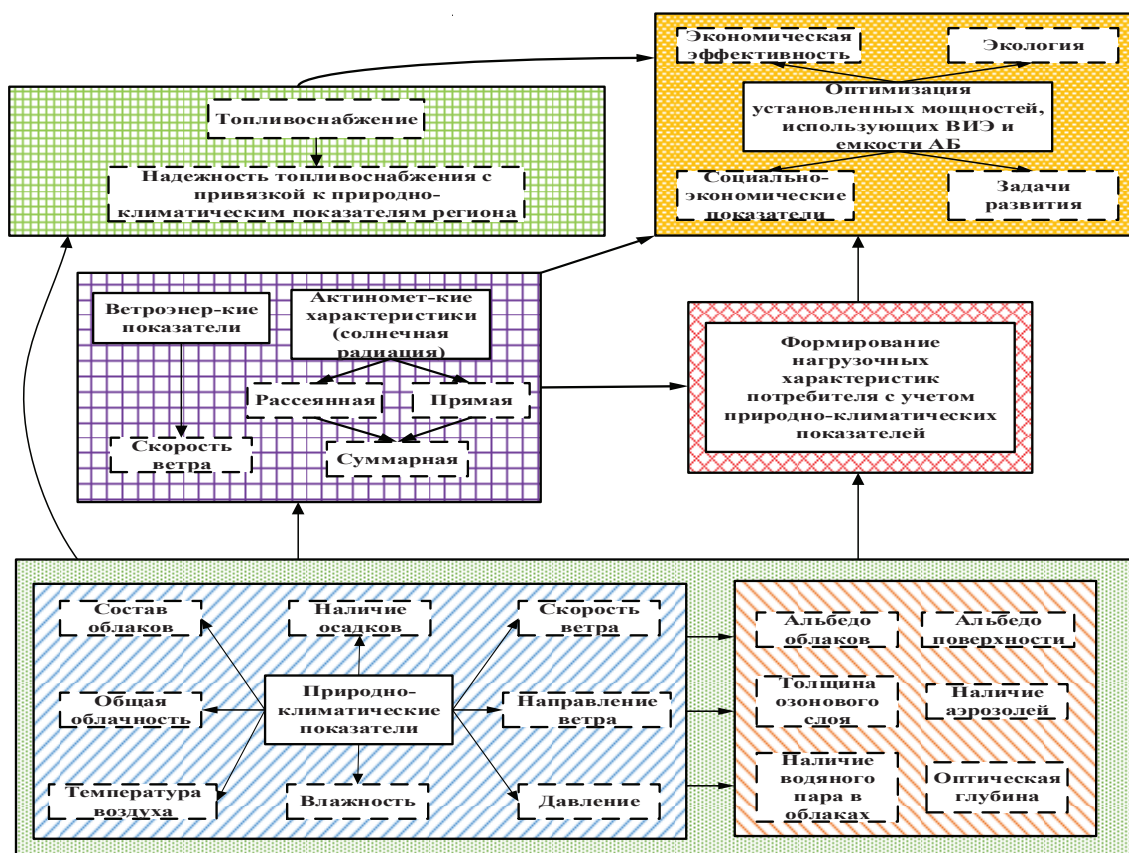


Рис. 1. Задачи, имеющие непосредственную связь с природно-климатическими показателями в рамках решения глобальной задачи оптимизации состава оборудования автономных энергокомплексов с ВИЭ и АБ

Fig. 1. Tasks that have direct relation to climatic indicators within the framework of the task of optimization of installation power which use renewable energy sources (RES) and storage batteries (SB)

тры зафиксированы одновременно, корреляция между ними учитывается неявным образом.

Важной составляющей является то, что при воспроизведении природно-климатической обстановки используется информация, полученная непосредственно с метеостанции.

По мнению автора статьи, разработка подобной концепции, свободной от вышеописанных недостатков, имеющихся подходов, позволит существенно увеличить точность, получаемых результатов в рамках решения различных задач системного характера в энергетике.

Содержательное описание

Многолетние метеорологические ряды, полученные на основании *срочных (FM 12 Synop)* или *ежечасных (METAR)* измерений, являются достаточно детализированной информацией. При этом международные коды *FM 12 Synop* и *METAR* имеют одинаковые показатели приборных измерений, а именно: скорость и направление ветра, температура воздуха, давление, влажность и отдельно качественная оценка общей облачности.

Матрица приборных измерений (A_m^k) k -го года расчетного периода, включая качественную оценку общей облачности

$$A_m^k = \begin{bmatrix} t & v_{wind} & T_{air} & p_{air} & \varphi_{\%} & \rho_{\%cloud} \\ t_0 & v_0 & T_0 & p_0 & \varphi_0 & \rho_0 \\ t_1 & v_1 & T_1 & p_1 & \varphi_1 & \rho_1 \\ t_2 & v_2 & T_2 & p_2 & \varphi_2 & \rho_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & v_n & T_n & p_n & \varphi_n & \rho_n \end{bmatrix}.$$

Стоит отметить, что код *FM 12 Synop* содержит более детальную информацию качественной оценки облачности, состава и высоты облаков, процент облаков плохой погоды, облака нижнего яруса (слоисто-кучевые, слоистые, слоисто-дождевые, кучево-дождевые), облака среднего яруса (высококучевые, кучевые, высокослоистые), облака верхнего яруса (перистые, перисто-кучевые и перисто-слоистые облака). В международном коде *METAR* качественная оценка облачности послойно записана в вектор-столбце, что значительно усложняет их обработку за счет построчного сравнения *эталонных (словесных)* значений массива относительно каждого временного интервала k -го года расчетного периода.

Матрица качественной оценки облачности (B_m^k) k -го года расчетного периода для *FM 12 Synop*

$$B_m^k = \begin{bmatrix} t & C_{lt} & C_{mt} & C_{ht} & b_{\%cloud} \\ t_0 & C_{lt0} & C_{mt0} & C_{ht0} & b_0 \\ t_1 & C_{lt1} & C_{mt1} & C_{ht1} & b_1 \\ t_2 & C_{lt2} & C_{mt2} & C_{ht2} & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & C_{lt-n} & C_{mt-n} & C_{ht-n} & b_n \end{bmatrix}.$$

Матрицы приборных измерений (A_m^k) и качественной оценки облачности (B_m^k) объединяются в единую матрицу природно-климатических показателей, где каждая строка есть вектор, характеризующий фактические значения параметров окружающей среды в опорных точках

$$x_i^{p,k} = \begin{pmatrix} v_{wind-i}^{p,k}, T_{air-i}^{p,k}, p_{air-i}^{p,k}, \varphi_{\%-i}^{p,k}, \rho_{\%cloud-i}^{p,k} \\ C_{lt-i}^{p,k}, C_{mt-i}^{p,k}, C_{ht-i}^{p,k}, b_{\%cloud-i}^{p,k} \end{pmatrix},$$

при $t=t_i, i=1...n$,

где $x_i^{p,k}$ – вектор, характеризующий состояние всех параметров окружающей среды относительно момента t_i в опорных точках k -го года.

При этом числовые значения параметров окружающей среды принимаются равными опорным значениям, замеренным на соответствующем трехчасовом или одночасовом временном интервале k -го года расчетного периода

$$x_i^{b,k} = \begin{cases} x_i^{p,k}, & \text{при } t = \Delta t_i \\ x_{i-1}^{p,k}, & \text{при } \Delta t_i > t < \Delta t_{i+1} \end{cases},$$

где $\Delta t_i = \{3, 6, 9, \dots, n\}$ для *FM 12 Synop*
и $\Delta t_i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ для *METAR*.

Иногда числовые значения параметров окружающей среды в опорных точках отсутствуют. Это, как правило, связано со сбоями работы метеорологической станции, которая по каким-либо причинам не смогла предоставить необходимую информацию в заявленный срок. Как показывает практика, наиболее часто подобные ситуации происходят с многолетними массивами с кодом *FM 12 Synop*, в то время как в массивах *METAR* такие моменты практически отсутствуют. Это связано с тем, что метеостанции, входящие в состав оборудования аэропорта, имеют большую надежность за счет резервных источников электроэнергии и дополнительных каналов связи.

Поэтому, если вектор-строка не имеет числовых значений $x_i^{p,k} = NaN(Not-a-Number)$, а последующая опорная точка свидетельствует о наличии, недостающих данных в предыдущих вектор-строках вследствие каких-либо причин, то создается массив нулевых значений $x_i^{p-zm,k}$ k -го года расчетного периода, где соответствующая вектор-строка заполняется данными исходя из следующих условий:

$$x_i^{p-zm,k} = \begin{cases} x_{i-1}^{p,k}; (x_{i-1}^{p,k} \leq x_{i+1}^{p,k}) \wedge (x_{i+1}^{p,k} < x_{i-1}^{p,k} \cdot q^s) \\ \frac{(x_{i-1}^{p,k} + x_{i+1}^{p,k})}{2}; (x_{i-1}^{p,k} > x_{i+1}^{p,k}) \wedge (x_{i+1}^{p,k} > x_{i-1}^{p,k} \cdot q^s) \\ 0; x_i^{p,k} \neq NaN \end{cases}.$$

Данные условия выполняются в случае, когда временной интервал между $x_{i-1}^{p,k}$ и $x_{i+1}^{p,k}$ составляет от одного до трех часов, то есть исходя из Δt_i рассматриваемого кода метеорологических данных. При аналогичной ситуации с качественной оценкой облачности многолетних массивов *FM 12 Synop* числовые значения в опорных точках принимают

ся равными значениям предыдущей имеющейся вектор-строки.

В случае отсутствия данных и нахождении временного интервала между $x_{i-1}^{p,k}$ и $x_{i+1}^{p,k}$ от трех, но не более двадцати четырёх часов, записывается уравнение прямой через имеющиеся опорные точки, где с дискретным шагом в один час находятся необходимые значения отсутствующих метеорологических параметров. Аналогично определяются числовые значения качественной оценки облачности с округлением до ближайшего целого значения.

$$x_i^{p,k} = \begin{bmatrix} t_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ t_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix} x_i^{p-zm k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ t_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}.$$

$$\downarrow$$

$$x_i^{p,k} = \begin{bmatrix} t_1 & a_1 & b_1 & c_1 \\ t_2 & a_2 & b_2 & c_2 \\ t_3 & a_3 & b_3 & c_3 \\ t_4 & a_4 & b_4 & c_4 \\ t_5 & a_5 & b_5 & c_5 \\ t_n & a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}$$

Более длительные провалы метеонаблюдений встречаются довольно редко. Однако в случае их обнаружения выполняется следующий алгоритм. Сравниваются все числовые значения рассматриваемого года относительно временных интервалов t_i с числовыми значениями других лет метеорологических наблюдений, и недостающие данные принимают значения данных самого схожего года.

После того как все недостающие числовые значения метеорологических параметров в опорных точках восстановлены, далее по уже ранее озвученному сценарию выполняется определение значений промежуточных вектор-строк $x_i^{b,k}$.

Также в рамках данной концепции используются информация об изменении вертикальной толщины озонового слоя, наличии капель воды и пара в облаках и т. д. Данные показатели находятся в свободном доступе в электронных архивах *World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOURDC)* и *AErosol RObotic NETwork (AERONET)*. Отметим, что данные показатели необходимы для более точного определения актинометрических характеристик рассматриваемого района. В целом их обработка выполняется аналогично обработке данных для многолетних метеорологических рядов с международными кодами FM 12 Synop и METAR.

Программно-вычислительный комплекс

Представленная концепция реализована в ПВК «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации».

При определении актинометрических показателей, а именно прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, использовался *тандем* математических моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak*. Данные математические модели являются наиболее пригодными для воспроизведения фактических значений прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе. В целом определение актинометрических показателей является отдельным самостоятельным исследованием, поэтому с основными положениями, использования моделей *Iqbal* и *Kasten-Czeplak* для различных н.п. России в т. ч. за полярным кругом, можно ознакомиться в [89].

Работу ПВК можно представить следующей укрупненной блок-схемой (рис. 2).

Программно-вычислительный комплекс реализован на высокоуровневом языке программирования *Matlab*. При исследовании использовался компьютер со следующими характеристиками: Intel(R) Core™ i5–4690, 4×3.50 GHz, 8 Gb RAM [89].

Объекты исследования

В качестве объектов исследования были выбраны н.п., расположенные на территории *Дальнего Востока* России и американского штата *Аляска*. Такой выбор сделан не случайно. К примеру, даже в небольших н.п., расположенных на территории штата *Аляска*, находится небольшой аэропорт, в котором имеется метеостанция, передающая погодную сводку с международным кодом *METAR*. На территории России распространена обширная сеть метеостанций. Так, например, даже в рамках отдельного небольшого района, находящегося в составе субъекта РФ, имеется от 2 до 4 стационарных метеостанций, работающих с международным кодом *FM 12 Synop*.

В табл. 1 представлены н.п., географические координаты, количество лет метеонаблюдений и код передачи метеорологических данных.

Как видно, минимальное число лет метеонаблюдений для массивов *FM 12 Synop* составляет 8, в то время как для *METAR* – 5 лет. Стоит отметить, что размерность исходных массивов рассматриваемых объектов составляет от 43800×13 до 61320×13 для *METAR* и 35040×26 для *FM 12 Synop*. Данные массивы загружаются в рабочую область ПВК для дальнейшей автоматической обработки, анализа и выводов.

Численные результаты

Так как при воспроизведении природно-климатической обстановки *итоговый многолетний массив параметров окружающей среды* имеет большую размерность, а его описание относительно *k*-го года, месяца и т. д. расчетного периода является достаточно объемным материалом, то в рамках данной статьи относительно каждого рассматриваемого н.п. будут выделяться только основные при-



Рис. 2. Блок-схема укрупненно описывающая основные этапы работы ПВК «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации»

Fig. 2. Block-diagram describing basic steps of operation of the software «Local analysis of environmental parameters and solar radiation»

родно-климатические показатели, имеющие значительное влияние на результат оптимизационных исследований автономных энергетических комплексов, использующих ВИЭ и АБ. В табл. 2 представлены осредненные по годам расчетного периода актинометрические и ветроэнергетические показатели в рассматриваемых н.п.

Представленные численные результаты расчета получены на основании обработки многолетних массивов параметров окружающей среды. Однако, по мнению автора статьи, при решении сложных задач оптимизационно-прикладного характера с использованием ВИЭ и АБ требуется гораздо более узконаправленная информация, имеющая непосредственную связь с возможными вариантами компоновки рассматриваемого объекта.

Обсуждение полученных результатов

Анализ полученных результатов относительно рассматриваемых районов/боро позволяет выявить определенные закономерности, присущие только рассматриваемой территории.

1. *Олекминский район.* В целом полученные результаты показывают достаточно высокие и равномерно распределенные значения актинометрических показателей. Скорость ветра в рамках рассматриваемого района характеризу-

ется достаточно низкими значениями, не превышающими 3 м/с.

2. *Нижнеколымский район.* Высокоширотное расположение рассматриваемого района существенно сказывается на показателях как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. Более детально представим показатели скорости ветра для следующих н.п.

- *Амбарчик.* Данный н.п. находится на побережье *Колымского залива*, поэтому наличие крупного водного объекта существенно сказывается на показателях скорости ветра. На рис. 3 показано изменение среднемесячной скорости ветра относительно 12 лет расчетного периода по данным многолетних метеорологических наблюдений.

При этом важной составляющей является количество часов, при которых скорость ветра превышает определенный установленный порог. Как правило, этот порог устанавливается исходя из характеристик используемого ветроэнергетического оборудования. На практике часто используется значение скорости ветра, при котором ВЭУ выходит на номинальный режим работы. На рис. 4 показано количество часов в месяце, при которых скорость ветра >5 м/с относительно каждого года расчетного периода.

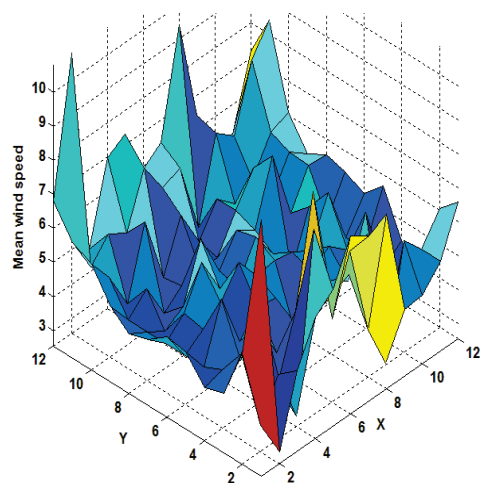
Таблица 1. Общие сведения о рассматриваемых объектах

Table 1. Overview the objects under consideration

Страна, субъект Country, subject	Район/боро District/barough	Населенный пункт Settlement	Географические координаты Geographical coordinates*	Кол-во лет наблюдений Number of years of observations	Код передачи данных Data transfer code**
РФ/Russia,  Респ. Якутия Yakutia  	Олекминский Olyokminsky 	Тинная/Tinnaya	60,21; 116,97	8	1
		Теген/Tegen	61,02; 119,10	8	
		Олом/Olom	60,44; 119,28	8	
		Саняхтах/Sanyakhtakh	60,60; 124,08	12	
		Бясь-Кюель/Byas-kuel	59,46; 119,28	10	
	Нижнеколымский Nizhnekolymsky 	Амбарчик/Ambarchik	69,61; 162,28	12	
		Колымское/Kolymskoe	68,71; 158,70	12	
		Андрюшкино/Andryushkino	70,66; 154,43	12	
	Сунтарский Suntarsky 	Крестях/Krestyakh	62,25; 116,16	8	
		Сунтар/Suntar	61,02; 117,63	12	
		Нерюктяй/Neryuktyay	62,78; 117,41	12	
США/USA,  Штат Аляска Alaska  	Алеутские острова Aleutian Islands 	Адак/Adak	51,88; 176,63	5	2
		Атка/Atka	52,18; 174,20	5	
		Якутат/Yakutat	59,53; 139,70	12	1
		Кадьяк/Kodiak	57,78; 152,38	12	
		Колд-Бей/Cold-Bay	55,20; 162,70	12	
	Юкон-Коюкук Yukon-Koyukuk 	Форт Юкон/Fort Yukon	66,56; 145,25	7	2
		Беттлс/Bettles	66,90; 151,51	12	
		Мак-Грат/McGrath	62,57; 155,56	12	
	Ном Nome 	Ном/Nome	64,50; 165,40	8	1
		Уэйлс/Wales	65,93; 167,71	12	2
		Диомид/Diomedea	65,75; 168,95	12	

* Для территории РФ – восточная долгота, США – западная долгота; ** 1 – FM 12 Synop, 2 – METAR.

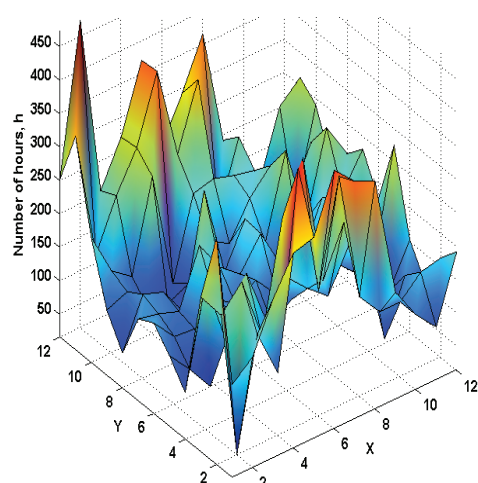
* For the territory of the Russian Federation – eastern longitude, USA – western longitude.



X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 3. Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Амбарчик

Fig. 3. Average monthly wind speed in months of the calculation period in Ambarchik



X – номер года/Number of year
Y – номер месяца/Number of month

Рис. 4. Количество часов по месяцам расчетного периода при скорости ветра >5 м/с в н.п. Амбарчик

Fig. 4. Number of hours per month of the estimated period at speed wind >5 m/s in Ambarchik

Таблица 2. Осредненные по годам расчетного периода актинометрические и ветроэнергетические показатели

Table 2. Actinometric and wind energy indicators averaged over the years of the calculation period

Населенный пункт Settlement	Солнечная радиация, кВт·ч/м ² Solar radiation kW·h/m ² (min/max)	Среднеквадратичное отклонение, % Standard deviation, %	Коэффициент осцилляции, % Oscillation coefficient, %	Среднемесячная скорость ветра, м/с Average monthly wind speed, m/s	Направление ве- тра, %* Wind direction, %*
Тинная/Tinnaya	1189/1153	11	3	1,6; 1,4; 1,7; 1,9; 2,0; 1,7; 1,6; 1,6; 1,6; 1,9; 1,5; 1,4	N-7; S-9; W-5; E-1; «0»-78;
Саньяктах Sanyakhtakh	1154/1101	15	4	1,7; 1,3; 1,1; 1,4; 1,6; 1,4; 1,4; 1,6; 1,7; 1,6; 1,5; 1,5	N-7; S-11; W-21; E-8; «0»-53;
Олом/Olom	1141/1105	10	3	1,3; 1,4; 1,9; 2,0; 2,3; 1,5; 1,2; 1,2; 1,4; 1,8; 1,2; 1,1	N-13; S-18; W-12; E-2; «0»-55
Теген/Tegen	1145/1112	10	3	1,3; 1,4; 1,9; 2,0; 2,3; 1,5; 1,2; 1,2; 1,4; 1,8; 1,2; 1,1	N-13; S-18; W-12; E-2; «0»-55
Бясь-Кюель/Byas-kuel	1192/1150	13	3	0,2; 0,3; 0,6; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,6; 0,6; 0,4; 0,2	N-7; S-3; W-0; E-0; «0»-90
Амбарчик/Ambarchik	849/789	18	7	6,2; 5,0; 4,9; 4,4; 4,6; 4,8; 4,6; 4,8; 4,6; 5,0; 6,0; 6,8	N-8; S-54; W-4; E-8; «0»-26
Колымское/Kolymskoe	894/812	28	9	2,5; 2,5; 2,7; 2,9; 3,2; 3,4; 3,2; 3,2; 3,2; 2,8; 2,8; 3,1	N-20; S-35; W-7; E-9; «0»-29
Андрюшкино Andryushkino	808/765	15	6	2,0; 2,2; 2,1; 2,6; 3,4; 4,0; 3,7; 3,6; 3,4; 2,5; 2,5; 2,4	N-25; S-37; W-3; E-5; «0»-30
Крестях/Krestyakh	1121/1078	12	4	0,8; 0,9; 1,4; 1,8; 2,2; 1,9; 1,7; 1,6; 1,7; 1,8; 0,9; 0,6	N-12; S-25; W-5; E-1; «0»-57
Сунтар/Suntar	1198/1145	16	4	1,3; 1,4; 1,6; 1,9; 2,2; 1,9; 1,7; 1,7; 1,9; 1,9; 1,3; 1,0	N-13; S-44; W-6; E-2; «0»-35
Нерюктяй/Neryuktyay	1121/1066	17	5	1,8; 1,7; 1,8; 2,2; 2,7; 2,3; 2,0; 1,9; 2,1; 2,3; 1,7; 1,4	N-15; S-39; W-7; E-3; «0»-35
Адак/Adak	1319/1235	30	7	5,8; 6,7; 7,0; 6,5; 6,1; 5,3; 4,5; 5,5; 6,0; 7,5; 7,9; 7,5	N-18; S-31; W-10; E-5; «0»-36
Атка/Atka	1321/1345	28	8	5,7; 6,8; 7,1; 6,4; 6,3; 5,1; 4,6; 5,4; 6,2; 7,8; 7,7; 7,6	N-19; S-30; W-11; E-4; «0»-36
Якутат/Yakutat	1212/1122	27	8	2,3; 2,0; 2,0; 1,7; 1,9; 1,6; 1,5; 1,5; 1,9; 1,9; 2,2; 2,1	N-5; S-22; W-2; E-17; «0»-54
Кадьяк/Kodiak	1198/1157	14	4	4,8; 4,8; 4,9; 4,5; 3,9; 3,5; 3,1; 3,0; 3,4; 4,2; 4,8; 5,0	N-19; S-19; W-9; E-7; «0»-47
Колд-Бей /Cold-Bay	1264/1151	30	9	6,7; 6,9; 6,6; 6,9; 6,2; 6,2; 6,0; 5,9; 6,6; 6,7; 7,3; 7,3	N-18; S-41; W-9; E-2; «0»-30
Форт Юкон/Fort Yukon	885/837	15	6	1,5; 1,5; 2,5; 3,1; 2,6; 2,3; 2,3; 1,9; 2,3; 2,0; 1,2; 1,4	N-24; S-12; W-4; E-1; «0»-58
Беттлс/ettles	858/829	8	3	1,5; 1,7; 2,0; 2,2; 2,1; 1,7; 1,6; 1,3; 1,6; 1,8; 1,7; 1,6	N-23; S-20; W-1; E-0; «0»-55
Мак-Грат/McGrath	1011/974	11	4	0,9; 1,2; 1,6; 1,9; 2,0; 1,8; 1,7; 1,5; 1,5; 1,6; 1,2; 0,8	N-11; S-19; W-4; E-2; «0»-63
Ном/Nome	912/889	7	2	4,2; 4,1; 3,1; 3,2; 3,5; 3,9; 4,0; 3,8; 3,7; 4,0; 4,1; 4,3	N-19; S-22; W-5; E-10; «0»-43
Уэйлс/Wales	989/909	25	8	5,5; 5,3; 4,3; 4,4; 4,8; 5,4; 5,6; 5,9; 6,5; 6,9; 7,6; 7,2	N-29; S-30; W-2; E-3; «0»-36
Диомид/Diomedede	965/892	26	8	5,8; 5,8; 4,7; 4,6; 5,6; 5,7; 5,9; 6,3; 6,9; 7,2; 7,9; 7,4	N-35; S-33; W-2; E-3; «0»-27

* N – Север/North; S – Юг/South; W – Запад/West; E – Восток/East; «0» – Штиль/Calm.

Помимо количества часов, при которых скорость ветра превышает некоторое пороговое значение, также необходимо анализировать направление ветра, при котором выполняются вышеописанные условия. На рис. 5 показано суммарное количество часов, при которых скорость ветра > 5 м/с относительно А – северного и Б – южного направления в н.п. Амбарчик на протяжении всего цикла расчетного периода.

Из рис. 5 видно, что в течение зимнего и осеннего периода ветер, превышающий 5 м/с, возникает с южного направления, включающего юго-западное и юго-восточное направления. При этом в весенний и летний периоды направление ветра (> 5 м/с) меняется на северное, включающее северо-западное и северо-восточное. Причем, подобная ситуация возникает ежегодно. Цикличность продиктована наступающими из года в год барическими

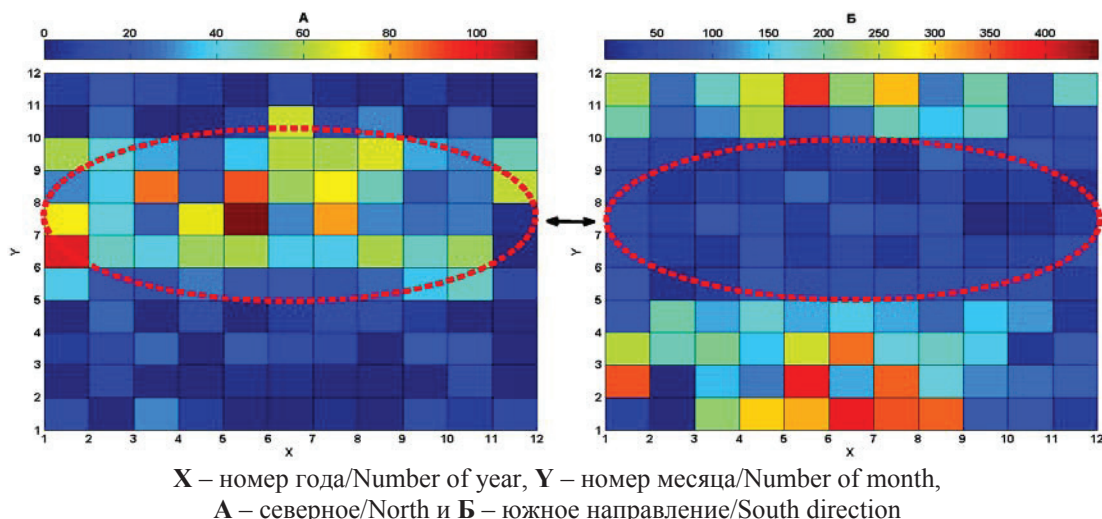
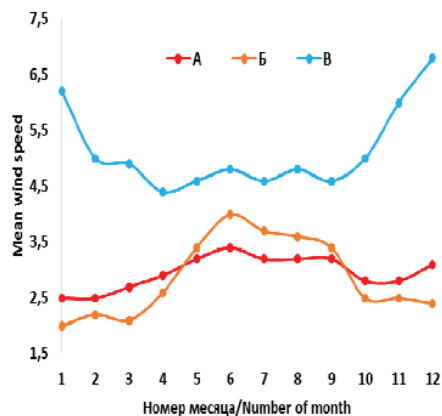


Рис. 5. Количество часов, при которых скорость ветра >5 м/сек относительно направления ветра в н.п. Амбарчик на протяжении всего цикла расчетного периода

Fig. 5. Number of hours when wind speed is >5 m/s relative to the direction of the wind in Ambarchik throughout the whole cycle of the calculation period

ми депрессиями, отвечающими за долгосрочную (сезонную) климатическую обстановку на рассматриваемой территории [89].

- *Колымское, Андриюшкино.* За счет относительно близкого расположения данных н.п. актинометрическая и ветроэнергетическая обстановка в целом имеет схожий характер. Однако за счет значительного удаления от *Колымского залива* средняя скорость ветра существенно ниже по сравнению с *Амбарчик* (рис. 6).



A – Колымское/Kolymskoe
 Б – Андриюшкино/Andryushkino
 В – Амбарчик/Ambarchik

Рис. 6. Среднемесячная скорость ветра в н.п. Колымское, Андриюшкино, Амбарчик

Fig. 6. Average monthly wind speed in Kolymskoe, Andryushkino, Ambarchik

3. *Сунтарский район.* Данный район расположен в центральной части Республики *Якутия*. В целом актинометрические показатели в н.п. *Крестях, Сунтар, Нерюктяй* имеют достаточ-

но высокий уровень. Среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне от 12 до 17 %, а коэффициент осцилляции не более 5 %. Детализированный анализ скорости ветра показывает, что ветроэнергетический потенциал на рассматриваемой территории является низким и не превышающим 3 м/с.

4. *Алеутские острова боро.* Рассматриваемое боро является архипелагом вулканического происхождения, находящегося в относительной близости к *Беринговому морю* и *Тихому океану*.

- *Адак, Атка, Кадьяк, Колд-Бей.* Рассматриваемые н.п. характеризуются высокими показателями солнечной радиации относительно всего цикла расчетного периода. На рис. 7 показано поведение суммарной солнечной радиации на протяжении 12 летнего цикла расчетного периода (105120 часов) в н.п. *Адак*.

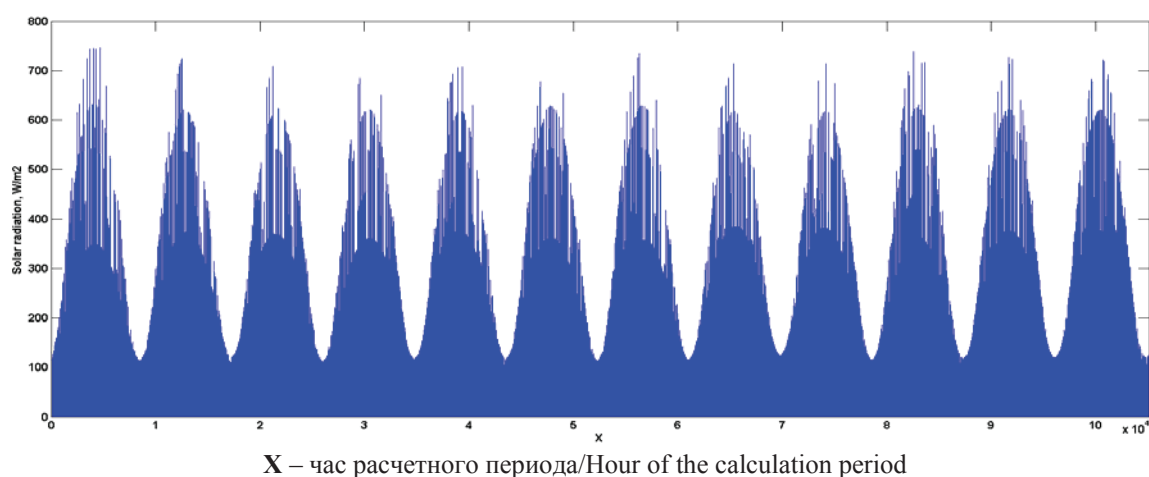
На рис. 8 продемонстрированы характеристики среднемесячной солнечной радиации в н.п. *Адак, Атка, Кадьяк, Колд-Бей*.

Анализ скорости ветра показывает достаточно высокие показатели. При этом необходимо выделить *северное* и *южное* направление со стороны *Берингова моря* и *Тихого океана* (табл. 2).

На рис. 9 показаны осредненные временные показатели, характеризующие количество часов, при которых скорость ветра >5 м/с в н.п. *Адак, Атка, Кадьяк, Колд-Бей*.

5. *Юкон-Коюкук боро.* Является крупнейшим боро штата *Аляска* и расположена в центральной его части. Актинометрические показатели варьируются в зависимости от широтного расположения, рассматриваемых н.п. и фактической облачности. Ветроэнергетические показатели в целом по рассматриваемым н.п. <3 м/с.

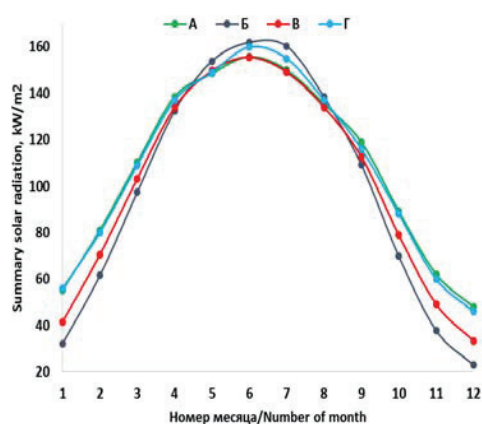
- *Форт Юкон, Беттлс, Мак-Грат.*



X – час расчетного периода/Hour of the calculation period

Рис. 7. Солнечная радиация на протяжении 12 лет расчетного периода в н.п. Адак

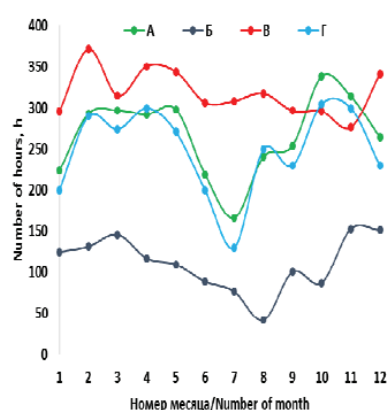
Fig. 7. Solar radiation for 12 years of the calculation period in Adak



A – Адак/Adak, Б – Кадьяк/Kodiak,
 В – Колд-Бей/Cold-Bay, Г – Атка/Atka

Рис. 8. Среднемесячная суммарная солнечная радиация в н.п. Адак, Кадьяк, Колд-Бей, Атка

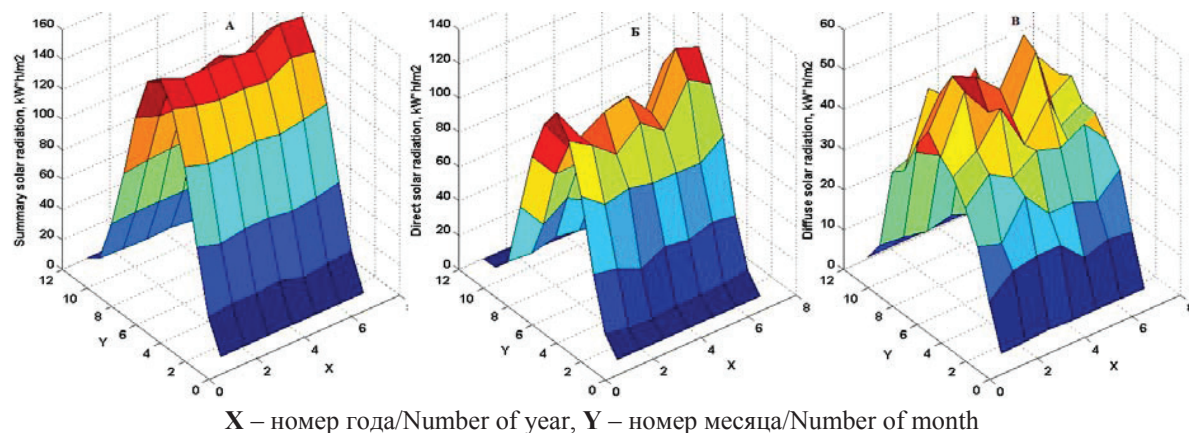
Fig. 8. Average monthly summary solar radiation in Adak, Kodiak, Cold Bay, Atka



A – Адак/Adak, Б – Кадьяк/Kodiak,
 В – Колд-Бей/Cold-Bay, Г – Атка/Atka

Рис. 9. Количество часов, при которых скорость ветра >5 м/с в н.п. Адак, Кадьяк, Колд-Бей, Атка

Fig. 9. Number of hours when wind speed is >5 m/s in Adak, Kodiak, Cold Bay, Atka



X – номер года/Number of year, Y – номер месяца/Number of month

Рис. 10. А) суммарная; Б) прямая; В) рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в н.п. Форт-Юкон на протяжении 7 лет расчетного периода

Fig. 10. A) summary; Б) direct; В) diffuse solar radiation, arriving on horizontal surface in the settlement of Fort Yukon for 7 years of the calculation period

На рис. 11 демонстрируется суммарная солнечная радиация в н.п. *Мак-Грат* относительно каждого часа расчетного периода с учетом фактической облачности на протяжении 12 лет (105120 часов).

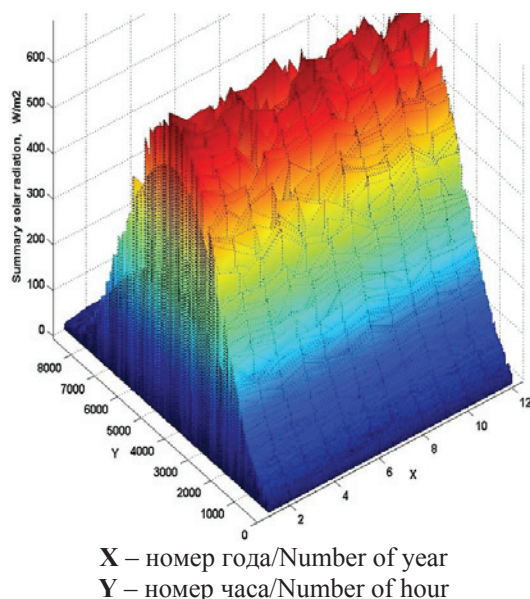
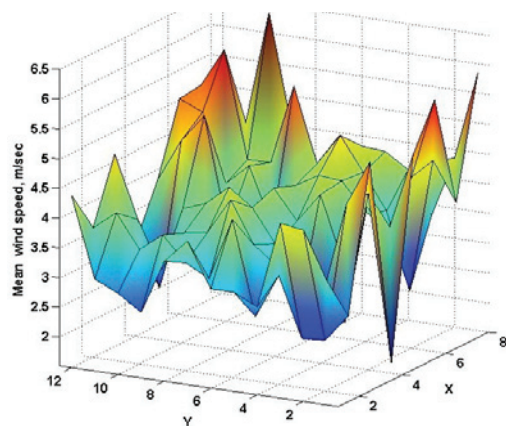


Рис. 11. Суммарная солнечная радиация в н.п. Мак-Грат относительно каждого часа расчетного периода с учетом фактической облачности на протяжении 12 лет

Fig. 11. Summary solar radiation in McGrath for each hour of the calculation period, taking into account the actual cloud cover over 12 years



X – номер года/Number of year
 Y – номер месяца/Number of month

Рис. 12. Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Ном

Fig. 12. Average monthly wind speed in months of the calculation period in Nome

6. *Ном боро.* Располагается на западе штата *Аляска* омывается водами *Берингова моря*, *Берингова пролива* и *залива Нортон*.

- *Ном, Уэйлс, Диомид.* Актинометрические показатели находятся на среднем уровне и не превышают 1000 кВт·ч/м² в год. Скорость ветра в н.п. *Ном* на высоте 10 м находится в диапазоне от 3 до 5 м/с. На рис. 12 показано

изменение среднемесячной скорости ветра относительно 8 лет расчетного периода по данным многолетних метеорологических наблюдений.

На рис. 13 показано изменение среднемесячной скорости ветра относительно 12 лет расчетного периода в н.п. *Диомид*.

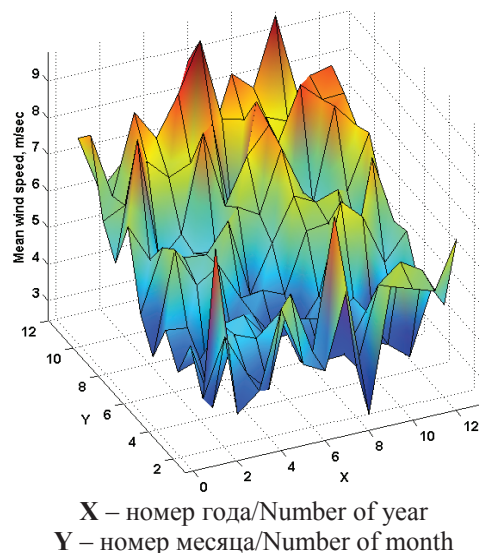


Рис. 13. Среднемесячная скорость ветра по месяцам расчетного периода в н.п. Диомид

Fig. 13. Average monthly wind speed in months of the calculation period in Diomed

Выводы

При воспроизведении природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории с использованием многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR* необходимо выделить следующее:

1. Природно-климатическая обстановка в рассматриваемых районах/боро существенно варьируется и зависит от локальных особенностей рельефа местности (равнины, горы, тайга, вулканические образования, крупные водные объекты и т. д.), поэтому использование многолетних метеорологических рядов, взятых с ближайшей от рассматриваемого объекта метеостанции, является одним из эффективных способов учесть локальные особенности рельефа местности.
2. Автоматическая обработка многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR* показала следующее: глубокие метеорологические провалы продолжительностью более недели наблюдались только в многолетних массивах *FM 12 Synop*, в то время как в *METAR* такие моменты отсутствовали. Более того, отсутствие нескольких замеренных значений в опорных точках массива *METAR* не приводит к существенным ошибкам, так как шаг дискретизации измерений равен одному часу.

3. В ряде рассматриваемых районов/боро детальный анализ скорости ветра, его продолжительности, а также направления показал, что из года в год возникают циклические процессы смены направления ветра, связанные с барическими депрессиями (рис. 5). При этом определение временных интервалов, в рамках которых происходит смена барических депрессий, позволяет более точно трактовать результаты оптимизационных исследований исходя из фактических значений скоростных характеристик ветра, его направления и продолжительности относительно каждого временного интервала расчетного периода.
4. При определении актинометрических показателей большое значение имеет широтное расположение рассматриваемого н.п. с учетом астрономических явлений: полярная ночь и полярный день. Населенным пунктам, удаленным от крупных водных объектов (моря, океаны, заливы и т. д.), присуще достаточно равномерное распределение солнечной радиации с уточнением широтного расположения (например, *Олекминский район, Юкон-Коюкук* (табл. 2)). Это связано с достаточно равномерным распределением и сменой облачности на рассматриваемой территории. В то же время н.п., расположенные на островах или имеющие непосредственную связь с крупным водным объектом, подвержены более частыми сменами климатической обстановки, что сказывается на результатах моделирования как прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, так и их статистических показателей.

Заключение

В работе представлен детальный обзор наиболее распространенных в мире подходов, используемых при описании параметров окружающей среды в рамках решения задачи оптимизации состава оборудования, использующего ВИЭ. Выделены недостатки существующих подходов, степень их влия-

ния на результаты исследований, на основании которых была сформирована задача разработки единой концепции, позволяющей воспроизводить природно-климатическую обстановку на рассматриваемой территории с последующей интеграцией в задачи системного характера в энергетике.

Приведено описание концепции с использованием многолетних метеорологических рядов с международными кодами *FM 12 Synop* и *METAR*, необходимыми для воспроизведения природно-климатической обстановки в рамках решения глобальной задачи оптимизации состава оборудования с использованием *хронологического метода* расчета системы. Проведено исследование, в результате которого была воспроизведена природно-климатическая обстановка в 22 н.п., расположенных на территории Республики *Якутия* и американского штата *Аляска*. Получены актинометрические и ветроэнергетические характеристики относительно каждого временного интервала с последующей их автоматической обработкой, визуализацией, анализом и выводами. Все исследования проводились на ПВК «*Локальный анализ параметров окружающей среды и солнечной радиации*», реализованном на высокоуровневом языке программирования *Matlab*. Полученные *итоговые многолетние массивы параметров окружающей среды* планируется использовать в дальнейших исследованиях оптимизационно-прикладного характера, связанного с использованием ВИЭ и АБ в автономных энергетических комплексах. Использование таких массивов позволяет при достаточно детализированных моделях элементов системы производить оптимизационные исследования с применением *хронологического метода* расчета системы с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений на протяжении всего цикла расчетного периода.

В целом представленная в рамках данной статьи концепция будет развиваться, а также максимально интегрироваться в сопутствующие исследования системного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике: элементы теории, направления развития. – М.: Изд-во «Наука», 1983. – 447 с.
2. Блауберг И.В., Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Системный подход в современной науке проблемы методологии системных исследований. – М.: Мысль, 1970. – 455 с.
3. Громыко Г.Л. Теория статистики. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 476 с.
4. Sapan Thapar, Seema Sharma, Ashu Verma. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 66. – P. 487–498.
5. Pulak Mishra, Bhagirath Behera. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 56. – P. 953–964.
6. Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages // *Energy Policy*. – 2017. – V. 106. – P. 278–287.
7. Ali M. Adil, Yekang Ko. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 57. – P. 1025–1037.
8. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
9. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 273 с.
10. Fang-Fang Li, Jun Qiu. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system // *Applied Energy*. – 2016. – V. 167. – P. 377–384.

11. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP / Lin Ye, Hai Bo Sun, Xu Ri Song, Li Cheng Li // *Renewable Energy*. – 2012. – V. 39. – P. 96–106.
12. Wagemann B., Manetsgruber D. Risk Management for Mini-grid Deployment in Rural Areas // *Energy Procedia*. – 2016. – V. 103. – P. 106–110.
13. Xuan Liu, Ye Hu, Yan Xiao. Risk management for rural energy industry of Sichuan Province in China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 69. – P. 1029–1044.
14. Role of smart grid in renewable energy: an overview / M.S. Hossein, N.A. Madloul, N.A. Rahim, J. Selvaraj, A.K. Pandey, A.F. Khan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 60. – P. 1168–1184.
15. Sunanda Sinha, S.S. Chandel. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 50. – P. 755–769.
16. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 380–389.
17. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment // *Solar Energy*. – 2006. – V. 80. – P. 578–588.
18. International Renewable Energy Agency (IRENA). Remap 2030. A renewable energy roadmap. URL: <http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/REmap.pdf> (дата обращения: 25.05.2017).
19. Прогноз экспертов Greenpeace о ВИЭ к 2030 году. URL: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/nuclear/accidents/chernobyl/25yrs/renewable-energy/> (дата обращения: 25.05.2017).
20. Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (дата обращения: 25.05.2017).
21. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (дата обращения: 25.05.2017).
22. The Paris Agreement A new framework for global climate action. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_\(2016\)573910_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_(2016)573910_EN.pdf) (дата обращения: 25.05.2017).
23. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 91. – P. 53–63.
24. Law of the Republic of Belarus – about renewable energy (December 27, 2010. N 204-3) URL: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (дата обращения: 25.05.2017).
25. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 58. – P. 87–106.
26. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.Sh. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States // *Energy Policy*. – 2016. – V. 98. – P. 653–662.
27. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh / S. Mollik, M.M. Rashid, M. Hasanuzzaman, M.E. Karim, M. Hosenuzzaman // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 65. – P. 553–567.
28. Renewable energy development in rural areas of Iran / N. Afsharzade, A. Papzan, M. Ashjaee, S. Delangizan, S. Van Passel, H. Azadi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 65. – P. 743–755.
29. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria // *Energy for Sustainable Development*. – 2013. – V. 17. – P. 504–509.
30. Van Gevelt T. Rural electrification and development in South Korea // *Energy for Sustainable Development*. – 2014. – V. 23. – P. 179–187.
31. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review / N.J. Williams, P. Jaramillo, J. Taneja, T.S. Ustun // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1268–1281.
32. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
33. Карамов Д.Н. Влияние объектов агропромышленного комплекса, на результат комплексной оптимизации децентрализованных систем электроснабжения, использующих возобновляемые источники энергии // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 8. – С. 107–112.
34. Саврасов Ф.В., Лукутин Б.В. Расчёт эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 6. – С. 17–21.
35. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удаленных потребителей в климатических условиях Севера Российской Федерации / М.А. Сурков, С.Г. Обухов, И.А. Плотников, Л.П. Сумарокова, М.М. Попов, С.А. Байдали // *Интернет-журнал «Наукоедение»*. – 2016. – № 4. – С. 1–13. URL: <https://naukovednie.ru/PDF/97TVN416.pdf> (дата обращения: 25.05.2017).
36. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review / S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu, E. Colombo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 58. – P. 1621–1646.
37. «РАО ЕЭС Востока». URL: <http://www.rao-esv.ru/map> (дата обращения: 25.05.2017).
38. Лукутин Б.В., Лукутин О.Б., Шандарова Е.Б. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 203–206.
39. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.
40. Применение буферных накопителей энергии для повышения энергоэффективности ветродизельных электростанций / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.А. Шутков, З.П. Хошна // *Электричество*. – 2012. – № 6. – С. 24–29.
41. Dursun E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2012. – V. 34. – P. 81–89.
42. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // *Solar Energy*. – 2013. – V. 97. – P. 460–473.
43. Glavin M.E., Hurley W.G. Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system // *Solar Energy*. – 2012. – V. 86. – P. 3009–3020.
44. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications / D. Tsuanyo, Y. Azoumah, D. Aussel, P. Neveu // *Energy*. – 2015. – V. 86. – P. 152–163.

45. Optimization of a Multi-Source System with Renewable Energy Based on Ontology / D. Saba, F.Z. Laallam, A.E. Hadidi, B. Berbaoui // *Energy Procedia*. – 2015. – V. 74. – P. 608–615.
46. Chang K.-H., Lin G. Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2015. – V. 52. – P. 40–51.
47. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 119. – P. 279–288.
48. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil / C.E.C. Nogueira, M.L. Vidotto, R.K. Niedzialkoski, S.N.M. de Souza, L.I. Chaves, T. Edwiges, D.B. dos Santos, I. Werncke // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 29. – P. 151–157.
49. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions / B.O. Bilal, V. Sambou, C.M.F. Kebe, P.A. Ndiaye, M. Ndongo // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 195. – P. 1636–1647.
50. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia / E.M.A. Mokheimer, A.Z. Sahin, A. Al-Sharafi, A.I. Ali // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 75. – P. 86–97.
51. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas // *Energy Procedia*. – 2012. – V. 20. – P. 258–270.
52. Fathima A.H., Palanisamy K. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1391–1404.
53. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems / J. Allegrini, K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, R. Evins // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1391–1404.
54. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1135–1147.
55. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system / A. González, J.-R. Riba, A. Rius, R. Puig // *Applied Energy*. – 2015. – V. 154. – P. 752–762.
56. Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system / Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinjing Peng // *Applied Energy*. – 2015. – V. 160. – P. 728–736.
57. Optimal Sizing Design and Energy Management of Stand-alone Photovoltaic/Wind Generator Systems / I. Tégani, A. Aboubou, M.Y. Ayad, M. Becherif, R. Saadi, O. Kraa // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 50. – P. 163–170.
58. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations // *Energy Procedia*. – 2011. – V. 6. – P. 666–677.
59. Kumar R., Gupta R.A., Bansal A.K. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm // *Swarm and Evolutionary Computation*. – 2013. – V. 8. – P. 33–43.
60. Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms // *Solar Energy*. – 2015. – V. 115. – P. 471–483.
61. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico / V.M. Sanchez, A.U. Chavez-Ramirez, S.M. Duron-Torres, J. Hernandez, L.G. Arriaga, J.M. Ramirez // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – P. 16646–16655.
62. RP5.ru – Reliable Prognosis. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 25.05.2017).
63. NASA SSE. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.05.2017).
64. National Renewable Energy Laboratory, Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL-SWERA). URL: <https://maps.nrel.gov/swera/> (дата обращения: 25.05.2017).
65. Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S. Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER // *Energy*. – 2017. – V. 126. – P. 461–474.
66. Kolhe M.L., Iromi Udumbara Ranaweera K.M., Sisara Gunawardana A.G.B. Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2015. – V. 11. – P. 53–64.
67. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria / L. Olatomiwa, S. Mekhilef, A.S.N. Huda, O.S. Ohunakin // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 83. – P. 435–446.
68. Lawder M.T., Viswanathan V., Subramanian V.R. Balancing autonomy and utilization of solar power and battery storage for demand based microgrids // *Journal of Power Sources*. – 2015. – V. 279. – P. 645–655.
69. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions / S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche // *Applied Energy*. – 2008. – V. 85. – P. 968–987.
70. A Computer Program Development for Sizing Stand-alone Photovoltaic-Wind Hybrid Systems / H. Belmili, M.F. Almi, B. Bendi, S. Bolouma // *Energy Procedia*. – 2013. – V. 36. – P. 546–557.
71. Ershad A.M., Brecha R.J., Hallinan K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 85. – P. 445–453.
72. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands / P. Blechinger, C. Cader, P. Bertheau, H. Huyskens, R. Seguin, C. Breysse // *Energy Policy*. – 2016. – V. 98. – P. 674–687.
73. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology // *Applied Energy*. – 2008. – V. 85. – P. 1086–1101.
74. Banu Yetkin Ekren, Orhan Ekren. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1387–1394.
75. Orhan Ekren, Banu Yetkin Ekren. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing // *Applied Energy*. – 2010. – V. 87. – P. 592–598.
76. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // *Renewable Energy*. – 2004. – V. 29. – P. 1793–1809.
77. Wind potential assessment of Quebec Province / A. Ilincă, E. McCarthy, J.-L. Chaumel, J.-L. Rétiveau // *Renewable Energy*. – 2003. – V. 28. – P. 1881–1897.
78. Feili H.R., Moghadas F., Naderipour P. Optimization of Solar Cooling Systems with Simulation Modeling // *Journal of mathematics and computer Science*. – 2013. – V. 6. – P. 286–291.
79. Transient System Simulation Tool – «TRNSYS». URL: <http://www.trnsys.com/> (дата обращения: 25.05.2017).
80. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and Control Strategy of a Hybrid PV/Wind/Engine/Battery System to Provide Electricity and Drinkable Water for Remote Applications // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 57. – P. 1401–1410.
81. Sizing and maintenance visits optimization of a hybrid photovoltaic-hydrogen stand-alone facility using evolutionary algorithms /

- S. Jiménez-Fernández, S. Salcedo-Sanz, D. Gallo-Marazuela, G. Gómez-Prada, J. Maellas, A. Portilla-Figueras // *Renewable Energy*. – 2014. – V. 66. – P. 402–413.
82. OpenFOAM. URL: <http://www.openfoam.com/> (дата обращения: 25.05.2017).
83. Fluent. URL: <https://www.sharcnet.ca/> (дата обращения: 25.05.2017).
84. GitHub. URL: <https://github.com/> (дата обращения: 25.05.2017).
85. Lamigueiro O.P. SolaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R // *Journal of Statistical Software*. – 2012. – V. 50. – P. 1–32.
86. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills // *Solar energy*. – 1969. – V. 12. – P. 333–346.
87. Schulze R.E. A physically based method of estimating solar radiation from suncards // *Agricultural Meteorology*. – 1976. – V. 16. – P. 85–101.
88. Atwater M.A., Ball J.T. A surface solar radiation model for cloudy atmosphere // *Monthly weather review*. – 1980. – V. 109. – P. 878–888.
89. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–38.
90. Bird R.E., Hulstrom R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces // *SERI Technical Report*. – 1981. – V. 69. – P. 642–761.
91. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model // *Applied Energy*. – 2001. – V. 69. – P. 191–224.
92. Haurwitz B. Insolation in relation to cloud type // *Journal Meteorology*. – 1948. – V. 5. – P. 110–113.
93. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud // *Solar Energy*. – 1980. – V. 24. – P. 177–189.
94. Rasit Ata. Artificial neural networks applications in wind energy systems: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 49. – P. 534–562.
95. Ramasamy P., Chandel S.S., Yadav A.K. Wind speed prediction in the mountainous region of India using an artificial neural network model // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 80. – P. 338–347.
96. Alaska Energy Authority. Renewable energy atlas of Alaska. A guide to Alaska's clean, local and inexhaustible energy sources // REAP: Renewable Energy Alaska Project. URL: <http://www.akenergyauthority.org/Portals/0/Publications/2015HighRes.pdf?ver=2016-04-21-120237-447> (дата обращения: 25.05.2017).
97. Typical meteorological year. Hourly solar radiation surface meteorological observations. User manual TD-9734. – Ashville, North Carolina: National climatic center, 1981. – 26 p.
98. TRNSYS Frequently Asked Questions. URL: http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/standard_tmy.htm (дата обращения: 25.05.2017).
99. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman / A.S. Al Busaidi, H.A. Kazem, A.H. Al-Badi, M.F. Khan // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 53. – P. 185–193.

Поступила 21.09.2017 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры электроснабжения и электротехники Энергетического института Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 620.9

FORMATION OF INITIAL METEOROLOGICAL ARRAYS USING LONG-TERM SERIES FM 12 SYNOP AND METAR IN SYSTEM ENERGY STUDIES

Dmitriy N. Karamov^{1,2},
dmitriy.karamov@mail.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, 664033, Irkutsk, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the work is caused by the lack of a unified concept of taking into account the natural and climatic conditions in system studies in the energy sector.

The main aim of the study is to demonstrate the possibility of using long-term meteorological observation data with international codes FM 12 Synop and METAR recorded at the nearest meteorological station from the object under consideration to reproduce the natural-climatic situation with a fixed estimated step throughout the entire cycle of the settlement period; to show the significance of long-term meteorological observation data in solving the global problem of optimizing the composition of autonomous energy complexes using renewable sources and energy storage applying the chronological method of calculating the system.

The methods. The concept introduced is consistently built on the fundamental provisions of the theory of system and interdisciplinary research with reference to the proven mathematical models that allow both processing and simulating natural climatic indices with a fixed discrete step. The work uses multi-year meteorological series with international codes FM 12 Synop and METAR, recorded at various weather stations in the Republic of Yakutia and the state of Alaska. A high-level Matlab programming language is used.

The results. The author has proposed a unified concept for reproduction of actinometrical and wind power indices, as well as many other natural and climatic parameters, having a direct connection with systemic tasks in the energy sector. This concept is implemented in the software and computing complex «Local analysis of environmental parameters and solar radiation» using a high-level programming language Matlab. The paper introduces the results of processing multi-year arrays of environmental parameters for 22 settlements located in various natural and climatic zones of the Republic of Yakutia and the American state of Alaska. The author carried out the detailed analysis of the results obtained with relevant conclusions and conclusions on the degree of their reliability and the possibility of using autonomous energy complexes with renewable sources and energy storage in the optimization studies applying the chronological method of calculating the system.

Key words:

Renewable energy sources, solar radiation, wind energy potential, meteorological series, system research, optimization power of equipment, chronological method.

REFERENCES

- Melentiev L.A. *Systemnye issledovaniya v energetike: element teorii, napravleniya razvitiya* [System research in power engineering: elements of theory, directions of development]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 447 p.
- Blaugberg I.V., Sadovsky V.N., Yudin E.G. *Systemny podkhod v sovremennoy nauke problem metodologii sistemnykh issledovaniy* [System approach in modern science problems of the methodology of system studies]. Moscow, Mysl Publ., 1970. 455 p.
- Gromyko G.L. *Teoriya statistiki* [Theory of statistics]. Moscow, INFRA-M Publ., 2006. 476 p.
- Sapan Thapar, Seema Sharma, Ashu Verma. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 487–498.
- Pulak Mishra, Bhagirath Behera. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 56, pp. 953–964.
- Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages. *Energy Policy*, 2017, vol. 106, pp. 278–287.
- Ali M. Adil, Yekang Ko. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 1025–1037.
- Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
- Voropai N.I. *Teoriya system dlya elektroenergetikov* [Theory of systems for electric power industry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 273 p.
- Fang-Fang Li, Jun Qiu. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 377–384.
- Lin Ye, Hai Bo Sun, Xu Ri Song, Li Cheng Li. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP. *Renewable Energy*, 2012, vol. 39, pp. 96–106.
- Wagemann B., Manetsgruber D. Risk Management for Mini-grid Deployment in Rural Areas. *Energy Procedia*, 2016, vol. 103, pp. 106–110.
- Xuan Liu, Ye Hu, Yan Xiao. Risk management for rural energy industry of Sichuan Province in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 69, pp. 1029–1044.
- Hossain M.S., Madloul N.A., Rahim N.A., Selvaraj J., Pandey A.K., Khan A.F. Role of smart grid in renewable energy: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1168–1184.
- Sinha S., Chandel S.S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 50, pp. 755–769.
- Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 380–389.

17. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, pp. 578–588.
18. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Remap 2030. A renewable energy roadmap*. Available at: <http://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/REmap.pdf> (accessed 25 May 2017).
19. *Forecast of experts of Greenpeace*. Available at: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/nuclear/accidents/chernobyl/25yrs/renewable-energy/> (accessed 25 May 2017).
20. *Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (accessed 25 May 2017).
21. *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (accessed 25 May 2017).
22. *The Paris Agreement A new framework for global climate action*. Available at: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_\(2016\)573910_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_(2016)573910_EN.pdf) (accessed 25 May 2017).
23. Pineda S., Bock A. Renewable-based generation expansion under a green certificate market. *Renewable Energy*, 2016, vol. 91, pp. 53–63.
24. *Law of the Republic of Belarus – about renewable energy* (December 27, 2010. N 204-3). Available at: <http://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=32614> (accessed 25 May 2017).
25. Zamfir A., Colesca S.E., Corbos R.-A. Public policies to support the development of renewable energy in Romania: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 87–106.
26. Govinda R., Timilsina B., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
27. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., Karim M.E., Hosenuzzaman M. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
28. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., Delangizan S., Van Passel S., Azadi H. Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
29. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, 2013, vol. 17, pp. 504–509.
30. Van Gevelt T. Rural electrification and development in South Korea. *Energy for Sustainable Development*, 2014, vol. 23, pp. 179–187.
31. Williams N.J., Jaramillo P., Taneja J., Ustun T.S. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1268–1281.
32. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
33. Karamov D.N. The agro-industrial complex facilities influence on the result of the complex optimization of the decentralized power supply systems using renewable energy sources. *The Bulletin of Krasnoyarsk agrarian University*, 2015, no. 8, pp. 107–112. In Rus.
34. Savrasov F.V., Lukutin B.V. Calculation of the efficiency of the use of autonomous power supply systems with photoelectric stations in the conditions of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 6, pp. 17–21. In Rus.
35. Surkov M.A., Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Sumarokova L.P., Popov M.M., Baydali S.A. Feasibility assessment of photovoltaic plants for power supply of remote customers in the climatic conditions of Northern Russia. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 1–13. In Rus. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/97TVN416.pdf> (accessed 25 May 2017).
36. Mandelli S., Barbieri J., Mereu R., Colombo E. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 1621–1646.
37. «RAO EES Vostoka» [«RAO Energy Systems of the East»]. Available at: <http://www.rao-esv.ru/map> (accessed 25 May 2017).
38. Lukutin B.V., Lukutin O.B., Shandarova E.B. Energy-efficient power generation systems for autonomous wind stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 203–206. In Rus.
39. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. In Rus.
40. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shutov E.A., Khoshnau Z.P. Primenenie bufernykh nakopiteley energii dlya povysheniya energo-effektivnosti vetrodizelnykh elektrostantsii [Use of buffer storage for increasing energy efficiency wind-diesel power stations]. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 24–29.
41. Dursun E., Kilic O. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, vol. 34, pp. 81–89.
42. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 2013, vol. 97, pp. 460–473.
43. Glavin M.E., Hurley W.G. Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system. *Solar Energy*, 2012, vol. 86, pp. 3009–3020.
44. Tsuanyo D., Azoumah Y., Aussel D., Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy*, 2015, vol. 86, pp. 152–163.
45. Saba D., Laallam F.Z., Hadidi A.E., Berbaoui B. Optimization of a Multi-Source System with Renewable Energy Based on Ontology. *Energy Procedia*, 2015, vol. 74, pp. 608–615.
46. Chang K.-H., Lin G. Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, vol. 52, pp. 40–51.
47. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimizing system weight. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 119, pp. 279–288.
48. Nogueira C.E.C., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., De Souza S.N.M., Chaves L.I., Edwige T., Dos Santos D.B., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 29, pp. 151–157.
49. Bilal B.O., Sambou V., Kebe C.M.F., Ndiaye P.A., Ndongo M. Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO₂ Emissions. *Energy Procedia*, 2014, vol. 195, pp. 1636–1647.
50. Mokheimer E.M.A., Sahin A.Z., Al-Sharafi A., Ali A.I. Modeling and optimization of hybrid wind–solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 75, pp. 86–97.
51. Ranjeva M., Kulkarni A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/Rural Areas. *Energy Procedia*, 2012, vol. 20, pp. 258–270.

52. Fathima A.H., Palanisamy K. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1391–1404.
53. Allegrini J., Orehounig K., Mavromatidis G., Ruesch F., Dorer V., Evins R. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1391–1404.
54. Mahesh A., Sandhu K.S. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1135–1147.
55. González A., Riba J.-R., Rius A., Puig R. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 752–762.
56. Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinqing Peng. Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system. *Applied Energy*, 2015, vol. 160, pp. 728–736.
57. Tégnani I., Aboubou A., Ayad M.Y., Becherif M., Saadi R., Kraa O. Optimal Sizing Design and Energy Management of Stand-alone Photovoltaic/Wind Generator Systems. *Energy Procedia*, 2014, vol. 50, pp. 163–170.
58. Notton G., Diaf S., Stoyanov L. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations. *Energy Procedia*, 2011, vol. 6, pp. 666–677.
59. Kumar R., Gupta R.A., Bansal A.K. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2013, vol. 8, pp. 33–43.
60. Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 471–483.
61. Sanchez V.M., Chavez-Ramirez A.U., Duron-Torres S.M., Hernandez J., Arriaga L.G., Ramirez J.M. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, pp. 16646–16655.
62. RP5.ru – Reliable Prognosis. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 25 May 2017).
63. NASA SSE. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (accessed 25 May 2017).
64. National Renewable Energy Laboratory, Solar and Wind Energy Resource Assessment (NREL-SWERA). Available at: <https://maps.nrel.gov/swera/> (accessed 25 May 2017).
65. Rajbongshi R., Borgohain D., Mahapatra S. Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER. *Energy*, 2017, vol. 126, pp. 461–474.
66. Kolhe M.L., Ranaweera K.M.I.U., Sisara Gunawardana A.G.B. Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for rural electrification in Sri Lanka. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2015, vol. 11, pp. 53–64.
67. Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A.S.N., Ohunakin O.S. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria. *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 435–446.
68. Lawder M.T., Viswanathan V., Subramanian V.R. Balancing autonomy and utilization of solar power and battery storage for demand based microgrids. *Journal of Power Sources*, 2015, vol. 279, pp. 645–655.
69. Diaf S., Notton G., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 968–987.
70. Belmili H., Almi M.F., Bendi B., Bolouma S. A Computer Program Development for Sizing Stand-alone Photovoltaic-Wind Hybrid Systems. *Energy Procedia*, 2013, vol. 36, pp. 546–557.
71. Ershad A.M., Brecha R.J., Hallinan K. Analysis of solar photovoltaic and wind power potential in Afghanistan. *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp. 445–453.
72. Blechinger P., Cader C., Bertheau P., Huyskens H., Seguin R., Breyer C. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 674–687.
73. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy*, 2008, vol. 85, pp. 1086–1101.
74. Ekren B.Y., Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 1387–1394.
75. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 592–598.
76. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1793–1809.
77. Ilinca A., McCarthy E., Chaumel J.-L., Rétiveau J.-L. Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, pp. 1881–1897.
78. Feili H.R., Moghadasi F., Naderipour P. Optimization of Solar Cooling Systems with Simulation Modeling. *Journal of mathematics and computer Science*, 2013, vol. 6, pp. 286–291.
79. Transient System Simulation Tool – «TRNSYS». Available at: <http://www.trnsys.com/> (accessed 25 May 2017).
80. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and Control Strategy of a Hybrid PV/Wind/Engine/Battery System to Provide Electricity and Drinkable Water for Remote Applications. *Energy Procedia*, 2014, vol. 57, pp. 1401–1410.
81. Jiménez-Fernández S., Salcedo-Sanz S., Gallo-Marazuela D., Gómez-Prada G., Maellas J., Portilla-Figueras A. Sizing and maintenance visits optimization of a hybrid photovoltaic-hydrogen stand-alone facility using evolutionary algorithms. *Renewable Energy*, 2014, vol. 66, pp. 402–413.
82. OpenFOAM. Available at: <http://www.openfoam.com/> (accessed 25 May 2017).
83. Fluent. Available at: <https://www.sharcnet.ca/> (accessed 25 May 2017).
84. GitHub. Available at: <https://github.com/> (accessed 25 May 2017).
85. Lamigueiro O.P. SolaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R. *Journal of Statistical Software*, 2012, vol. 50, pp. 1–32.
86. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 1969, vol. 12, pp. 333–346.
87. Schulze R.E. A physically based method of estimating solar radiation from suncards. *Agricultural Meteorology*, 1976, vol. 16, pp. 85–101.
88. Atwater M.A., Ball J.T. A surface solar radiation model for cloudy atmosphere. *Monthly weather review*, 1980, vol. 109, pp. 878–888.
89. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
90. Bird R.E., Hulstrom R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *SERI Technical Report*, 1981, vol. 69, pp. 642–761.
91. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. *Applied Energy*, 2001, vol. 69, pp. 191–224.
92. Haurwitz B. Insolation in relation to cloud type. *Journal Meteorology*, 1948, vol. 5, pp. 110–113.
93. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, pp. 177–189.

94. Ata R. Artificial neural networks applications in wind energy systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, pp. 534–562.
95. Ramasamy P., Chandel S.S., Yadav A.K. Wind speed prediction in the mountainous region of India using an artificial neural network model. *Renewable Energy*, 2015, vol. 80, pp. 338–347.
96. Alaska Energy Authority. Renewable energy atlas of Alaska. A guide to Alaska's clean, local and inexhaustible energy sources. REAP: Renewable Energy Alaska Project. URL: <http://www.akenergyauthority.org/Portals/0/Publications/2015HighRes.pdf?ver=2016-04-21-120237-447> (accessed 25 May 2017).
97. *Typical meteorological year. Hourly solar radiation surface meteorological observations. User manual TD-9734*. Ashville, North Carolina, National climatic center, 1981. 26 p.
98. *TRNSYS Frequently Asked Questions*. Available at: http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/standard_tmy.htm (accessed 25 May 2017).
99. Al Busaidi A.S., Kazem H.A., Al-Badi A.H., Khan M.F. A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in Oman. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 185–193.

Received: 21 September 2017.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 532.5

ПРОФИЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНЕРЦИОННЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Сиковский Дмитрий Филиппович^{1,2},
dphs@mail.ru

¹ Институт теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

² Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Актуальность работы обусловлена широким распространением турбулентных потоков газа со взвешенными частицами в различных технических устройствах, используемых в добыче полезных ископаемых, технологиях транспортировки природных ресурсов, энергетике и других отраслях промышленности. Примерами могут служить пневмотранспорт порошкообразных материалов, штреки горных выработок, газоходы котельных установок электростанций и металлургических заводов, вентиляционные каналы промышленных предприятий, паропроводы и другие элементы паросиловых установок, работающих на влажном паре и т. д. Важная роль, которую играют турбулентные газодисперсные потоки в природе и промышленности, диктует необходимость исследования закономерностей взаимодействия частиц с ограничивающими поток поверхностями и развития современных моделей турбулентных двухфазных течений.

Цель работы: получение аналитического выражения для профиля концентрации частиц в турбулентном течении в плоском канале между параллельными пластинами на основе асимптотического анализа решений кинетического уравнения для функции плотности вероятности скорости и положения частицы, а также закономерностей турбулентного течения в канале без использования полуэмпирических гипотез замыкания. Анализ влияния размера частиц на их аккумуляцию вблизи стенки.

Методы исследования: асимптотический анализ решений кинетического уравнения для функции плотности вероятности скорости и положения частицы; метод Чепмена–Энскога решения кинетического уравнения; соображения размерности и подобия.

Результаты. Выполнен асимптотический анализ решений кинетического уравнения для функции плотности вероятности скорости частицы в турбулентном течении в плоском канале со взвешенными инерционными частицами. Получены общие выражения для концентрации инерционных частиц в вязком подслое, логарифмическом слое и внешней области потока. Предложен критерий аккумуляции частиц, для которого получено аналитическое выражение, показывающее резкий рост концентрации частиц в вязком подслое на почти 3 порядка величины при росте числа Стокса в диапазоне от 1 до 27, что согласуется с имеющимися данными DNS/лагранжева траекторного моделирования. Показано, что увеличение размера частицы ослабляет эффект аккумуляции и уменьшает пик концентрации на стенке при числах Стокса, превышающих 27. Получено аналитическое выражение, хорошо описывающее профиль концентрации частиц в вязком подслое.

Ключевые слова:

Турбулентность, газодисперсные потоки, аккумуляция частиц, законы подобия, статистическое моделирование.

Введение

Турбулентные течения с взвешенными частицами встречаются во многих задачах энергетики, химической технологии, астрофизики, атмосферной физики и океанографии и имеют большую практическую важность. Зачастую такие течения граничат с твёрдыми поверхностями, взаимодействие частиц с которыми может иметь важные последствия для их эксплуатации, например, образование наносов и агломератов, шлакование, эрозия и др. Моделирование динамики частиц на основе прямого решения уравнений Навье–Стокса с условиями прилипания на поверхности отдельных частиц является слишком сложным в реализации, поэтому для анализа физических механизмов взаимодействия частиц с турбулентностью целесообразно применять упрощенные модели взаимодействия частиц с потоком, наиболее часто используемой из которых является модель точечных частиц [1]. В этой модели, применимой для описания движения частиц размером меньше колмогоровского, частица заменена точкой, расположенной в её центре масс, на которую действуют силы, являющиеся функционалами скорости среды в этой

точке. Для случая тяжелых частиц с большой величиной отношения плотностей частица/среда $\bar{\rho} = \rho_p / \rho_f \gg 1$ наиболее существенной является сила гидродинамического сопротивления, линейно пропорциональная разности скоростей частицы и среды при малых числах Рейнольдса обтекания частицы. Кроме того, для малых весовых концентраций частиц можно также пренебречь обратным влиянием частиц на турбулентность среды, рассматривая случайное поле скорости в точке нахождения частицы заданным и не зависящим от частиц. Однако даже в такой упрощённой постановке задача взаимодействия инерционных частиц с турбулентностью представляет трудности для теоретического анализа и демонстрирует ряд нетривиальных эффектов [2, 3], из которых одним из наиболее важных является аккумуляция (или сегрегация) частиц вблизи стенки. Аккумуляция частиц из ядра потока по направлению к стенке вызвана турбофорезом [4] – турбулентной миграцией частиц против градиента интенсивности флуктуаций нормальной к стенке компоненты скорости среды, которая вблизи стенки, как известно, затухает до нуля как квадрат расстояния до неё.

Кроме турбофореза имеется другой механизм переноса частиц к стенке – баллистический, когда частицы увлекаются в направлении стенки интенсивными когерентными вихревыми структурами на границе вязкого подслоя [5]. Для достаточно инерционных частиц характерный путь торможения становится сопоставимым с толщиной вязкого подслоя, в результате чего увлечённые вихрями частицы проникают в вязкий подслой по баллистическим траекториям, при этом из-за инерции частицы её скорость при приближении к стенке может существенно превышать локальные скорости среды. В результате вблизи стенки наблюдаются две группы частиц с заметно различающимися скоростями [6–8], что делает статистический режим пульсаций скорости частиц существенно неравновесным. Поскольку большинство известных в настоящее время моделей турбулентных двухфазных течений основано на квазиравновесных приближениях, адекватное моделирование аккумуляции частиц в пристенных турбулентных потоках является проблемой для теории многофазных течений.

В [8, 9] с помощью методов срачиваемых асимптотических разложений было показано, что в неравновесном режиме даже для сильноинерционных частиц в фазовом пространстве скоростей и координат частиц существует внутренний слой, в котором статистика частиц близка к равновесной вследствие того, что их скорости и характерные смещения за времена декорреляции турбулентных пульсаций скорости среды малы. В [8] показано, что частицы внутреннего слоя, называемые диффузионными, вносят основной вклад в сингулярность концентрации, наблюдаемую при аккумуляции. Эти результаты позволяют с хорошей точностью вычислять концентрацию частиц с помощью квазиравновесных методов замыкания, в то время как расчёт статистических моментов скорости частиц второго и более высокого порядков с использованием тех же моделей может в ряде случаев давать неверные результаты [10]. В настоящей работе на основе результатов [8, 9] и классической теории подобия пристенной турбулентности рассматриваются общие закономерности распределения концентрации в турбулентном течении в плоском канале.

Постановка задачи

Ниже будем рассматривать турбулентное течение в плоском канале полушириной δ на участке гидродинамической стабилизации, когда все статистические параметры потока зависят только от расстояния до стенки y . Приведём основные свойства однофазного турбулентного течения в каналах и трубах согласно классической теории пристенной турбулентности [11, 12]. Число Рейнольдса, построенное по полуширине канала, динамической скорости v_* и кинематической вязкости среды ν будем считать большим: $Re_\tau = v_* \delta \nu \geq 1$. Течение можно разделить на две области с существенно раз-

личающимися характерными масштабами длины. Внешняя область, или ядро потока, в которой $y \sim \delta$, занимает почти всю область потока и характеризуется слабой зависимостью статистического режима пульсаций скорости от молекулярной вязкости (принцип подобия по числу Рейнольдса [13]). Влияние вязкости на процессы переноса существенно в прилегающем к стенке вязком подслое, толщиной порядка вязкого масштаба длины $y \sim \nu v_*^{-1}$. Отношение толщин ядра потока и вязкого подслоя пропорционально числу Рейнольдса и является большой величиной. Граница между ними не является резкой и должна пониматься в смысле метода срачиваемых асимптотических разложений [14], как область перекрытия между внешней и внутренней областью, в которой $\nu v_*^{-1} \ll y \ll \delta$. Область перекрытия также называется логарифмическим слоем, поскольку именно здесь справедлив логарифмический закон для средней скорости [12]. Определяющими масштабами турбулентности в ядре потока являются v_* и δ , а в вязком подслое – v_* и ν . В области срачивания статистический режим турбулентных пульсаций скорости зависит только от v_* и y . Лагранжев масштаб времени турбулентности в ядре потока $T_{L\delta} \sim \delta \nu_*^{-1}$ существенно превышает его величину в вязком подслое $T_{Lv} \sim \nu v_*^{-2}$:

$$\frac{T_{L\delta}}{T_{Lv}} \sim Re_\tau \gg 1.$$

В логарифмическом слое лагранжев масштаб времени растёт линейно с удалением от стенки:

$$T_L \sim \frac{y}{v_*}.$$

Рассмотрим динамику взвешенных в рассматриваемом течении частиц малой весовой концентрации с размерами меньше колмогоровского масштаба, который в данном случае по порядку величины сравним с толщиной вязкого подслоя. Для таких частиц уравнение движения может быть записано в виде [2]:

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = v_p(t), \quad \frac{dv_p(t)}{dt} = \frac{u(x_p(t), t) - v_p(t)}{\tau}, \quad (1)$$

где x_p , v_p – координата и скорость частицы; $u(x_p(t), t)$ – скорость среды вдоль траектории частицы; τ – время динамической релаксации частицы, в стоковом приближении, равное $\tau = \tilde{\rho} d_p^2 / (18 \nu)$, где d_p – диаметр частицы; ν – вязкость среды; $\tilde{\rho} = \rho_p / \rho_f$ – отношение плотностей частицы и среды.

Безразмерный критерий, характеризующий инерционность частиц, в литературе принято называть числом Стокса. Согласно (1), единственным параметром, характеризующим инерционность частиц в вязком подслое, является время релаксации частиц, обезразмеренное с использованием характерных масштабов вязкого подслоя и ν : $St = \tau_+ = \nu_*^2 \tau \nu^{-1}$, где нижний индекс ‘+’ обозначает величину, обезразмеренную в масштабах вязкого подслоя. Именно такой вид числа Стокса для пристенных турбулентных течений встречается в

большинстве исследований [7]. При этом для больших чисел Рейнольдса число Стокса для внешней области $St_\delta = v_*^2 \tau \delta^{-1} = St Re_\tau^{-1}$ будет существенно меньше. Отсюда следует, что имеется достаточно широкий диапазон чисел Стокса $1 < St < Re_\tau$, в котором частица является одновременно инерционной в вязком подслое и безынерционной во внешней области. При этом, как было показано в [15], условная граница, разделяющая области «инерционности» и «безынерционности», располагается при $y_+ \sim St$. При $y_+ \gg St$ частица ведёт себя как пассивный трасер, поэтому перепады концентрации невелики ввиду интенсивного турбулентного перемешивания во внешней области. Наиболее интересные явления наблюдаются в вязком подслое, в котором ввиду резкого уменьшения нормальной к стенке интенсивности пульсационной скорости, по сравнению с внешней областью, имеет место турбофорез частиц по направлению к стенке, приводящий к аккумуляции частиц у стенки [4, 16]. Согласно имеющимся данным DNS/лагранжева траекторного моделирования [7], эффект аккумуляции наиболее выражен при $St=25$. Для чисел Стокса, близких к этому значению, условная граница, разделяющая области «инерционности» и «безынерционности», находится в районе границы вязкого подслоя. При числах Стокса около 100 и более для частиц с относительной плотностью $\tilde{\rho} \sim 10^3$ диаметр частицы становится сопоставим с толщиной вязкого подслоя и применимость приближения точечных сил и рассматриваемой теории нарушается.

Рассматривая поле скорости среды $u(x, t)$ в (1) как случайное поле с гауссовой статистикой скорости, можно показать [2, 3, 8], что функция плотности вероятности нормальной к стенке компоненты скорости и местоположения частицы (далее – ФПВ) $P(v, y) = \langle \delta(y - y_p(t)) \delta(v - v_p(t)) \rangle$ удовлетворяет кинетическому уравнению [2, 17]:

$$\tau \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(vP)}{\partial v} = \lambda \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + \mu \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial y}, \quad (2)$$

в котором диффузионные коэффициенты с хорошей точностью могут быть представлены в следующем виде:

$$\lambda = \tau^{-1} \int_0^\infty \langle R(x, 0; x_p(-t), -t) \rangle_x e^{-t/\tau} dt, \quad (3)$$

$$\mu = \int_0^\infty \langle R(x, 0; x_p(-t), -t) \rangle_x (1 - e^{-t/\tau}) dt, \quad (4)$$

где $R(x, t; x', t') = \langle v(x, t) v(x', t') \rangle$ – корреляционная функция нормальной к стенке компоненты скорости, и осреднение в подынтегральных выражениях проводится по всем траекториям частиц, удовлетворяющим условию $x_p(0) = x$.

Ниже для удобства будем считать все величины безразмерными с использованием характерных масштабов вязкого подслоя v_* и v . В этих единицах полуширина канала равна числу Рейнольдса Re_τ , а число Стокса равно τ .

Умножение (2) на v и интегрирование по скоростям приводит к полезному соотношению, связывающему концентрацию частиц $\Phi(y) = \int_{-\infty}^\infty P(v, y) dv$,

поток частиц на стенку $J_w = - \int_{-\infty}^\infty v P(v, y) dv$ и вто-

рой момент скорости $\langle v^2 \rangle \Phi = \int_{-\infty}^\infty v^2 P(v, y) dv$:

$$J_w = \tau \Phi \frac{d\langle v^2 \rangle}{dy} + (\langle v^2 \rangle \tau + \mu) \frac{d\Phi}{dy} = 0. \quad (5)$$

Согласно (5), поток частиц складывается из потока, вызванного турбулентной диффузией частиц (второй член в правой части (5)) и турбофорезом (первый член). Для рассматриваемого случая упругого отскока частиц от стенки результирующий поток частиц на стенку равен нулю, что также учтено в (5).

Асимптотика коэффициентов кинетического уравнения

Рассмотрим поведение диффузионных коэффициентов (3), (4) в различных подобластях пристенного турбулентного потока. Согласно классической теории подобия пристенной турбулентности, в вязком подслое и внешней области течения в канале должны выполняться соотношения:

$$\langle R(x, 0; x_p(-t), -t) \rangle_x = F_v(y, t, \tau), \quad y = O(1), \quad (6)$$

$$\langle R(x, 0; x_p(-t), -t) \rangle_x = F_o(y Re_\tau^{-1}, t Re_\tau^{-1}), \quad y = O(Re_\tau), \quad (7)$$

где F_v, F_o – универсальная функция своих аргументов, и предполагается, что число Стокса удовлетворяет условию $\tau \ll Re_\tau$, при котором, как уже упоминалось в предыдущем пункте, частица во внешней области ведёт себя как пассивный трасер, вследствие чего в выражении (7) нет явной зависимости от τ .

В логарифмическом слое, как области перекрытия между вязким подслоем и внешней областью, должны быть справедливы оба выражения – (6), (7) – одновременно, откуда следует

$$\langle R(x, 0; x_p(-t), -t) \rangle_x = F_{\log}(t/y), \quad 1 \ll y \ll Re_\tau, \quad (8)$$

Выражение (8) имеет простой смысл: характерный масштаб времени в логарифмическом слое линейно растёт с увеличением расстояния до стенки.

Важную роль в дальнейшем изложении играет асимптотика выражения (6) для малых расстояний от стенки:

$$F_v(y, t, \tau) \rightarrow y^4 f(t, \tau), \quad y \rightarrow 0, \quad (9)$$

где $f(t, \tau)$ – некоторая универсальная функция, а множитель y^4 связан с квадратичным убыванием нормальной к стенке компоненты скорости с уменьшением расстояния от стенки [8].

В соответствии с (6)–(9) диффузионные коэффициенты (3), (4) имеют следующее поведение:

$$\lambda \rightarrow A_\lambda(\tau)y^4, \quad \mu \rightarrow A_\mu(\tau)y^4, \quad y \rightarrow 0, \quad (10)$$

$$\lambda \rightarrow y\tau^{-1}B_\lambda(y/\tau), \quad \mu \rightarrow yB_\mu(y/\tau), \quad 1 \ll y \ll \text{Re}_\tau, \quad (11)$$

где

$$A_\lambda(\tau) = \tau^{-1} \int_0^\infty f(t, \tau) e^{-t/\tau} dt,$$

$$A_\mu(\tau) = \int_0^\infty f(t, \tau) (1 - e^{-t/\tau}) dt,$$

$$B_\lambda(\eta) = \int_0^\infty F_{\log}(s) e^{-s\eta} ds, \quad B_\mu(\eta) = \int_0^\infty F_{\log}(s) (1 - e^{-s\eta}) ds.$$

Функции B_λ , B_μ имеют следующие асимптотики при больших значениях аргумента:

$$B_\lambda(\eta) \rightarrow K = \int_0^\infty F_{\log}(s) ds,$$

$$B_\mu(\eta) \rightarrow \eta \int_0^\infty s F_{\log}(s) ds, \quad \eta \rightarrow 0,$$

$$B_\lambda(\eta) \rightarrow F_{\log}(0) \eta^{-1},$$

$$B_\mu(\eta) \rightarrow K - F_{\log}(0) \eta^{-1}, \quad \eta \rightarrow \infty. \quad (12)$$

Асимптотика решений кинетического уравнения

Рассмотрим решение кинетического уравнения (2) для случая турбулентного течения в плоском канале и упругого отскока частиц, соответствующего граничному условию на стенке для ФПВ скорости и положения частицы:

$$P(v, 0) = P(-v, 0).$$

Асимптотика решения вблизи стенки определяется уравнением, следующим из (2), после подстановки в него (10):

$$\tau \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(vP)}{\partial v} = y^4 \left(A_\lambda \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + A_\mu \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial y} \right). \quad (13)$$

Как показано в [8], решение (13) имеет характер внутреннего слоя вдоль линии нулевых скоростей в фазовом пространстве (v, y) с характерной толщиной $\sigma(y) = A_\lambda^{1/2} y^2$ и может быть определено с помощью метода Чепмена–Энскога, детали которого применительно к данной задаче описаны в [8, 9, 18]. Решение в главном приближении имеет вид гауссова распределения:

$$P = \frac{\Phi(y)}{\sqrt{2\pi}\sigma(y)} \exp \left[-\frac{v^2}{2\sigma^2(y)} \right] \quad (14)$$

и описывает так называемые диффузионные частицы, находящиеся в статистическом равновесии с турбулентностью несущей среды. Величина $\Phi(y)$ в (14) есть главное приближение для концентрации частиц, а $\sigma(y)$ – для среднеквадратичной пульсации скорости частиц внутреннего слоя:

$\langle v^2 \rangle \approx \sigma^2(y) = A_\lambda y^4$. Подставляя последнее выражение в (5), получим уравнение для главного приближения концентрации частиц вблизи стенки:

$$(A_\mu + \tau A_\lambda) y^4 \frac{d\Phi}{dy} + 4\tau A_\lambda y^3 \Phi = 0. \quad (15)$$

Решением (15) является степенная сингулярность концентрации частиц [8, 19]:

$$\Phi(y) = Ay^{-\alpha},$$

$$\alpha(\tau) = \frac{4\tau A_\lambda}{A_\mu + \tau A_\lambda} = 4 \frac{\int_0^\infty f(t, \tau) e^{-t/\tau} dt}{\int_0^\infty f(t, \tau) dt}, \quad (16)$$

где A – коэффициент, который будет определён позже.

Как показано в [8], вследствие наличия сингулярности концентрации (16) вклад диффузионных частиц (14) в общее решение при $y \rightarrow 0$ является доминирующим над вкладом баллистических частиц, который вследствие этого можно не учитывать в первом приближении. При удалении от стенки в области вязкого подслоя $y = O(1)$ вклады диффузионных и баллистических частиц становятся сопоставимыми.

Рассмотрим теперь решения уравнения (2) в логарифмическом слое $1 \ll y \ll \text{Re}_\tau$, для чего подставим асимптотики (11) в (4) и запишем кинетическое уравнение в виде:

$$\tau \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(vP)}{\partial v} = \frac{y}{\tau} B_\lambda(y/\tau) \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + y B_\mu(y/\tau) \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial y}.$$

Введя новую координату $\eta = y/\tau$, это уравнение можно переписать в универсальном виде, не зависящем явно от числа Стокса:

$$\frac{\partial(vP)}{\partial \eta} - \frac{\partial(vP)}{\partial v} = \eta B_\lambda(\eta) \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + \eta B_\mu(\eta) \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial \eta}, \quad (17)$$

откуда следует универсальный вид для ФПВ $P = P(v, \eta)$ в этой области, и, как следствие, для концентрации и моментов скорости частиц $\Phi = \Phi(\eta)$, $\langle v^2 \rangle = \sigma_{2p}(\eta)$.

Число Стокса τ , как известно, является характерным безразмерным путём торможения частицы – аналогом длины свободного пробега в кинетической теории газов. Вблизи стенки при малых η частицы становятся баллистическими и беспрепятственно достигают вязкого подслоя, откуда следует ненулевое значение второго момента скорости частиц $\sigma_{2p}(y)$ в интервале расстояний $1 \ll y \ll \tau$. Конечная скорость частиц препятствует формированию каких-либо особенностей концентрации частиц при малых η , несмотря на обращение в нуль при $\eta = 0$ диффузионных коэффициентов уравнения (17). Это можно также показать на основе аналога соотношения (5) для логарифмического слоя:

$$\Phi \frac{d\langle v^2 \rangle}{d\eta} + (\langle v^2 \rangle + \eta B_\mu(\eta)) \frac{d\Phi}{d\eta} = 0, \quad (18)$$

из которого при $\eta \rightarrow 0$ следует $\frac{d(\langle v^2 \rangle \Phi)}{d\eta} \rightarrow 0$ и следовательно (также [20]):

$$\Phi \sim \langle v^2 \rangle^{-1}.$$

С учётом (12) для больших значений координаты η уравнение (17) сводится к уравнению

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vP)}{\partial\eta} - (K\eta - F_{\log}(0)) \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial \eta} = \\ = F_{\log}(0) \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + \frac{\partial(vP)}{\partial v}, \end{aligned} \quad (19)$$

решение которого, как нетрудно убедиться, близко к равновесному решению, определяемому балансом двух членов в правой части (19). Оно имеет вид гауссова распределения (14), в котором $\sigma^2(y) = F_{\log}(0)$. Это означает, что интенсивность пульсаций скорости частиц в логарифмическом слое при $y \gg \tau$ равна интенсивности пульсаций скорости среды, поскольку, как уже упоминалось выше, на таких расстояниях от стенки частица ведёт себя как пассивная примесь. Подставляя $\langle v^2 \rangle = F_{\log}(0)$ и (12) в (18) полу-

чаем $K\eta \frac{d\Phi}{d\eta} = 0$, откуда следует, что вне логариф-

мического слоя концентрация в главном приближении постоянна и равна концентрации в центре канала $\Phi = \Phi_c$. В этом также можно убедиться непосредственно из балансного соотношения (5), из которого следует, что во внешней области $y = O(\text{Re}_\tau)$ изменения концентрации частиц по сечению канала $\Delta\Phi/\Phi_c \sim \tau \text{Re}_\tau^{-1} \ll 1$. Это позволяет определить предельный вид полученной выше универсальной функции концентрации в логарифмическом слое $\Phi = \Phi(\eta)$ и записать её в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_c [1 + f(y/\tau)], \quad y \gg 1, \quad (20)$$

где f – универсальная функция, удовлетворяющая условию $f(\eta) \rightarrow 0$.

Аккумуляция частиц в вязком подслое

Согласно результатам предыдущего пункта, концентрация частиц имеет степенную особенность (16) вблизи стенки. При удалении от стенки концентрация уменьшается до величин, сопоставимых с концентрацией в центре канала Φ_c , и становится практически постоянной в области $\tau \ll y \ll \text{Re}_\tau$, которая занимает большую часть потока в канале. Тогда концентрация частиц $\Phi(y_0) = A y_0^{-\alpha}$ на расстоянии $y_0 = O(1)$, соответствующем примерной границе применимости асимптотики (16), должна иметь порядок концентрации в центре канала Φ_c , причём коэффициент пропорциональности здесь может зависеть только от единственного параметра задачи в области вязкого подслоя – числа Стокса, откуда следует:

$$\Phi_c = B(\tau) A y_0^{-\alpha}, \quad (21)$$

где $B(\tau)$ – некоторая универсальная функция.

Поскольку осаждение частиц отсутствует, общая масса частиц в канале сохраняется в различных сечениях вдоль потока, что может быть записано в виде соотношения:

$$\int_r^{\text{Re}_\tau} \Phi(y) dy = \Phi_m \text{Re}_\tau, \quad (22)$$

где Φ_m – средняя концентрация частиц в канале, и учтено то, что частица не может подойти к стенке ближе, чем её радиус r , который для сферических частиц следующим образом выражается через число Стокса и относительную плотность частиц:

$$r = (4,5 \tau \tilde{\rho}^{-1})^{1/2}. \quad (23)$$

Руководствуясь результатами предыдущего пункта, пределы интегрирования в (22) можно разбить на два интервала, в каждом из которых основной вклад будет вносить соответствующие асимптотики (16) или (20):

$$\int_r^{\text{Re}_\tau} \Phi(y) dy = \int_r^{y_0} \Phi(y) dy + \int_{y_0}^{\text{Re}_\tau} \Phi(y) dy. \quad (24)$$

Первое и второе слагаемые в правой части представляют собой характерную массу частиц в вязком подслое и во внешней области, соответственно. Первый интеграл в правой части (24) можно оценить следующим образом:

$$\int_r^{y_0} \Phi(y) dy \approx \int_r^{y_0} A y^{-\alpha} dy = A \frac{r^{-(\alpha-1)} - y_0^{-(\alpha-1)}}{\alpha-1}. \quad (25)$$

Учитывая асимптотическую оценку при $\text{Re}_\tau \gg \tau$:

$$\begin{aligned} \int_{y_0}^{\text{Re}_\tau} [1 + f(y/\tau)] dy &= \text{Re}_\tau - y_0 + \tau \int_{y_0/\tau}^{\text{Re}_\tau/\tau} f(\eta) d\eta = \\ &= \text{Re}_\tau + O(1) + O(\tau) \approx \text{Re}_\tau, \end{aligned}$$

для второго интеграла в правой части (24) с учётом (21) можно записать:

$$\int_{y_0}^{\text{Re}_\tau} \Phi(y) dy \approx \Phi_c \text{Re}_\tau = B(\tau) A y_0^{-\alpha} \text{Re}_\tau. \quad (26)$$

Можно ввести критерий степени аккумуляции частиц в вязком подслое, характеризующий отношение средних концентраций частиц в вязком подслое $r < y < y_0$ и внешней области $y_0 < y < \text{Re}_\tau$, которое, как следует из (25), (26), может быть выражено следующим образом:

$$\frac{\text{Re}_\tau - y_0}{y_0 - r} \frac{\int_r^{y_0} \Phi(y) dy}{\int_{y_0}^{\text{Re}_\tau} \Phi(y) dy} \sim \Omega = \frac{\Delta^{1-\alpha} - 1}{(1-\Delta)(\alpha-1)}, \quad (27)$$

где малый параметр Δ равен отношению размера частицы к условной толщине вязкого подслоя:

$$\Delta = \frac{r}{y_0} = \sqrt{\frac{9\tau}{2y_0^2 \tilde{\rho}}}.$$

Величина Ω будет ниже называться параметром аккумуляции.

Для исследования зависимости параметра аккумуляции (27) от числа Стокса используем следующую аппроксимацию для показателя степени α [8]:

$$\alpha(\tau) = \frac{4\tau}{\tau + T_L}, \quad (28)$$

где $T_L \approx 7$ – лагранжев масштаб времени для нормальной к стенке компоненты скорости среды.

На рис. 1 изображена зависимость параметра аккумуляции (27) от числа Стокса для отношения плотностей $\tilde{\rho}=770$, используемого в большинстве исследований [7], и для значения параметра $y_0=3$, соответствующего примерной границе асимптотики (16). Для малоинерционных частиц величина показателя α мала и параметр Ω , как видно из рис. 1, близок к единице, что свидетельствует о близком к равномерному распределению частиц по сечению канала. При числах Стокса порядка двух начинается резкий рост параметра аккумуляции, который достигает максимума при $\tau=27$. Этот результат согласуется с упомянутыми выше результатами DNS/лагранжева траекторного моделирования [7], согласно которым эффект аккумуляции наиболее выражен при $\tau=25$. С дальнейшим увеличением числа Стокса, как видно из рис. 1, параметр аккумуляции уменьшается. Это уменьшение связано с влиянием размера частиц, который, согласно (23), растёт с увеличением числа Стокса. В связи с ростом интенсивности турбулентности среды при удалении от стенки увеличение радиуса частицы подвергает её более сильным флуктуациям скорости среды, что ослабляет эффект аккумуляции.

Весьма интересным является поведение параметра инерционности при стремлении к нулю радиуса частицы, что при фиксированном числе Стокса может быть реализовано за счёт неограниченного роста плотности частиц $\tilde{\rho} \rightarrow \infty$. В этом случае $\Delta \rightarrow 0$ и параметр аккумуляции (27) стремится к выражению

$$\Omega_\infty = \frac{1}{1 - \alpha(\tau)} = \frac{T_L + \tau}{3T_L - \tau}, \quad (29)$$

где использовано (28).

Как видно из (29), существует критическое значение числа Стокса $\tau_{cr} = T_L/3 \approx 2,33$, при котором параметр аккумуляции обращается в бесконечность. Это означает, что при числе Стокса, превышающем критическое, все частицы переходят из ядра потока в вязкий подслей. Это явление получило название перехода «локализация–делокализация» и было предсказано в работах [19, 21]. В этих работах, однако, не анализировался эффект ненулевого размера частиц [22], который, согласно (27), делает переход «локализация–делокализация» более плавным.

Соотношения (22), (24)–(26) позволяют выразить коэффициент A через среднюю концентрацию частиц:

$$A = \Phi_m \left[\frac{r^{-(\alpha-1)} - y_0^{-(\alpha-1)}}{(\alpha-1) \text{Re}_\tau} + B(\tau) y_0^{-\alpha} \right]^{-1}. \quad (30)$$

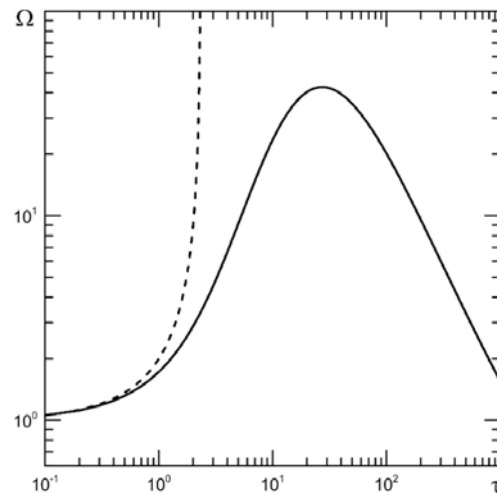


Рис. 1. Зависимость параметра аккумуляции от числа Стокса для частиц с относительной плотностью $\tilde{\rho}=770$ (сплошная линия) и частиц с очень большой плотностью $\tilde{\rho} \rightarrow \infty$ (пунктир)

Fig. 1. Accumulation parameter as a function of Stokes number for particles with the density ratio $\tilde{\rho}=770$ (solid line) and very high density $\tilde{\rho} \rightarrow \infty$ (dashed line)

Для чисел Стокса выше критического, когда $\alpha > 1$, и малых радиусов частиц $r \ll \text{Re}_\tau^{-\frac{1}{\alpha-1}}$ членами, содержащими y_0 в квадратных скобках в правой части (30), можно пренебречь, и выражение (30) перестаёт зависеть от каких-либо эмпирических коэффициентов, что с учётом (16) позволяет записать следующее выражение для профиля концентрации частиц в вязком подслое:

$$\frac{\Phi}{\Phi_m} \rightarrow (\alpha-1) \frac{\text{Re}_\tau}{r} \left(\frac{r}{y} \right)^\alpha. \quad (31)$$

Сравнение с данными DNS/лагранжева моделирования

Выражение (31) можно сравнить с имеющимися данными DNS/лагранжева траекторного моделирования турбулентного течения в плоском канале со взвешенными инерционными частицами с упругим отскоком от стенки [23, 24]. Параметры моделирования были следующие: плотность частиц $\tilde{\rho}=770$, полуширина канала $h=\text{Re}_\tau=150-155$, числа Стокса были равны $\tau=1, 5, 10, 25$. Для этих параметров зависимость радиуса частицы от числа Стокса имеет вид $r=0,076 \tau^{0,5}$, и для диапазона $\tau=1-25$ радиус частиц меняется от 0.076 до 0.38, что находится в пределах области применимости рассматриваемой теории $y < 3$ [8]. В начале численных расчётов [22, 23] задавалась равномерная начальная концентрация частиц $\Phi_0 = \Phi_m$.

Для проверки теоретической зависимости (31) использовалась аппроксимация (28) с $T_L=7$. На рис. 2, а–в изображены профили концентрации частиц, отнесенные к начальной средней концентрации Φ_0 , в сравнении с зависимостью (31).

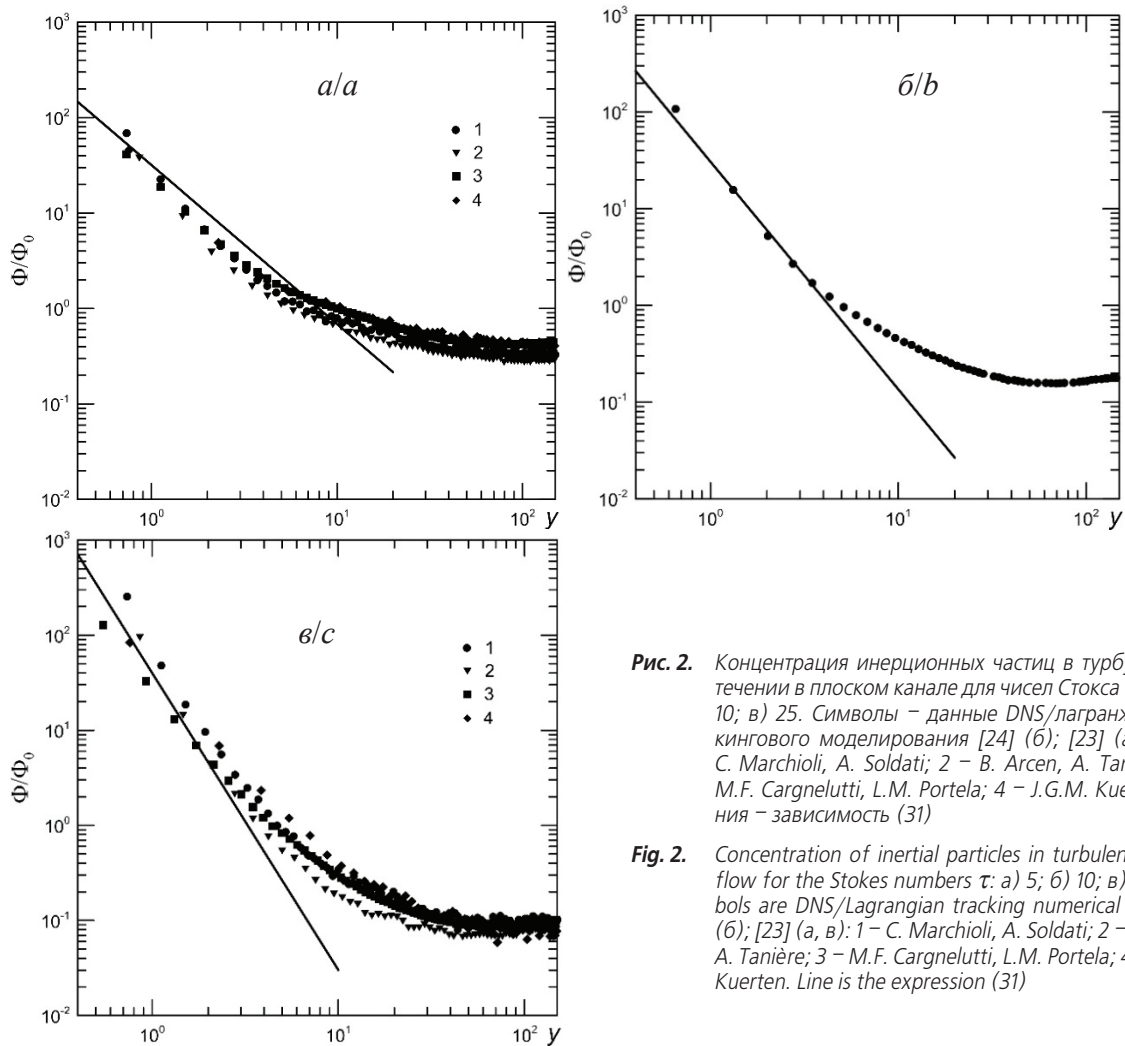


Рис. 2. Концентрация инерционных частиц в турбулентном течении в плоском канале для чисел Стокса τ : а) 5; б) 10; в) 25. Символы – данные DNS/лагранжева трекингового моделирования [24] (б); [23] (а, в): 1 – C. Marchioli, A. Soldati; 2 – B. Arcen, A. Tanière; 3 – M.F. Cargnelutti, L.M. Portela; 4 – J.G.M. Kuerten. Линия – зависимость (31)

Fig. 2. Concentration of inertial particles in turbulent channel flow for the Stokes numbers τ : а) 5; б) 10; в) 25. Symbols are DNS/Lagrangian tracking numerical data [24] (б); [23] (а, в): 1 – C. Marchioli, A. Soldati; 2 – B. Arcen, A. Tanière; 3 – M.F. Cargnelutti, L.M. Portela; 4 – J.G.M. Kuerten. Line is the expression (31)

В целом, с учётом разброса данных DNS различных авторов, можно отметить хорошее согласие между данными DNS и зависимостью (31) в диапазоне $0 < y < 3$ для чисел Стокса, превышающих 10. Наблюдаемое расхождение для числа Стокса $\tau=5$ объясняется тем, что в (30) уже нельзя пренебречь членами с y_0 в квадратных скобках в правой части. При $\tau=1$ показатель степени сингулярности становится меньше единицы $\alpha < 1$ и выражение (31) неприменимо, поэтому соответствующее сравнение не приводится.

Заключение

Асимптотический анализ решений кинетического уравнения для ФПВ скорости частицы в турбулентном течении в плоском канале позволил получить общие выражения для концентрации инерционных частиц в вязком подслое, логарифмическом слое и внешней области. Показано, что вследствие явления аккумуляции частиц под дей-

ствием турбофореза при больших значениях числа Стокса основная масса частиц сосредотачивается вблизи стенки в вязком подслое. Предложен критерий аккумуляции частиц, для которого получено аналитическое выражение, показывающее резкий рост концентрации частиц в вязком подслое на почти 3 порядка величины при росте числа Стокса от 1 до 27, что согласуется с имеющимися данными DNS/Лагранжева траекторного моделирования. Проанализировано влияние размера частицы на явление аккумуляции. Показано, что увеличение радиуса частицы ослабляет эффект аккумуляции и уменьшает пик концентрации на стенке. Получено аналитическое выражение, хорошо описывающее профиль концентрации частиц в вязком подслое в диапазоне расстояний от стенки $0 < y < 3$ для чисел Стокса, превышающих 10.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01685)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Z., Wei J., Yu B. Analysis of interphase forces and investigation of their effect on particle transverse motion in particle-laden channel turbulence // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2017. – V. 88. – P. 11–29.
2. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. – М.: Физматлит, 2007. – 312 с.
3. Reeks M.W. Transport, mixing and agglomeration of particles in turbulent flows // *Flow Turb. Comb.* – 2014. – V. 92. – P. 3–25.
4. Transfer of particles in nonisotropic air turbulence / M. Caporali, F. Tampieri, F. Trombetti, O. Vittori // *J. Atmos. Sci.* – 1975. – V. 32. – P. 565–568.
5. Friedlander S.K., Johnstone H.F. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams // *Ind. Eng. Chem.* – 1957. – V. 49. – P. 1151–1156.
6. Mechanism of the particle deposition in a fully developed turbulent open channel flow / C. Narayanan, D. Lakehal, L. Botto, A. Soldati // *Phys. Fluids*. – 2003. – V. 15. – P. 763–775.
7. Soldati A., Marchioli C. Physics and modelling of turbulent particle deposition and entrainment: Review of a systematic study // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2009. – V. 35. – P. 827–839.
8. Sikovsky D.Ph. Singularity of inertial particle concentration in the viscous sublayer of wall-bounded turbulent flows // *Flow Turb. Combust.* – 2014. – V. 92. – P. 41–64.
9. Sikovsky D.Ph. Stochastic Lagrangian Simulation of Particle Deposition in Turbulent Channel Flows // *Flow Turb. Combust.* – 2015. – V. 95. – P. 561–582.
10. Сиковский Д.Ф. Осаждение инерционных частиц из турбулентного потока в каналах при больших числах Рейнольдса // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 245–264.
11. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. Теория турбулентности. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 694 с.
12. Wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers: Recent advances and key issues / I. Marusic, B.J. McKeon, P.A. Monkewitz, H.M. Nagib, A.J. Smits, K.R. Sreenivasan // *Phys. Fluids*. – 2010. – V. 22. – P. 065103–1–24.
13. Townsend A.A. The structure of turbulent shear flow. 2nd ed. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1976. – 428 p.
14. Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. – М.: Мир, 1967. – 312 с.
15. Сиковский Д.Ф. Закономерности осаждения частиц из турбулентного газодисперсного потока в каналах // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. – 2010. – № 1. – С. 84–95.
16. Marchioli C., Soldati A. Mechanisms for particle transfer and segregation in turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* – 2002. – V. 468. – P. 283–315.
17. Swailes D.C., Darbyshire K.F.F. A generalized Fokker–Planck equation for particle transport in random media // *Physica A*. – 1997. – V. 242. – P. 38–48.
18. Swailes D.C., Sergeev Y.A., Parker A. Chapman–Enskog closure approximation in the kinetic theory of dilute turbulent gas-particle suspensions // *Physica A*. – 1998. – V. 254. – P. 517–547.
19. Belan S. Concentration of diffusional particles in viscous boundary sublayer of turbulent flow // *Physica A*. – 2016. – V. 443. – P. 128–136.
20. Inelastic collapse and near-wall localization of randomly accelerated particles / S. Belan, A. Chernykh, V. Lebedev, G. Falkovich // *Phys. Rev. E*. – 2016. – V. 93. – P. 052206–1–6.
21. Belan S., Fouxon I., Falkovich G. Localization-delocalization transitions in turbophoresis of inertial particles // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – V. 112. – P. 234502.
22. The effect of particle density in turbulent channel flow laden with finite size particles in semi-dilute conditions / W. Fornari, A. Formenti, F. Picano, L. Brandt // *Phys. Fluids*. – 2016. – V. 28. – P. 033301–1–19.
23. Statistics of particle dispersion in direct numerical simulations of wallbounded turbulence: Results of an international collaborative benchmark test / C. Marchioli, A. Soldati, J.G.M. Kuerten, B. Arcen, A. Taniere, G. Goldensohn, K.D. Squires, M.F. Cargnelli, L.M. Portela // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2008. – V. 34. – P. 879–893.
24. Pallares J., Vernet A., Grau F.X. Effect of the instantaneous turbulent flow structures on the particle distribution near the wall of a channel // *Eur. J. Mech. B/Fluids*. – 2014. – V. 46. – P. 144–153.

Поступила 29.11.2017 г.

Информация об авторах

Сиковский Д.Ф., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий Института теплофизики СО РАН; доцент кафедры физики неравновесных процессов Физического факультета Новосибирского государственного университета.

UDC 532.5

PROFILE OF INERTIAL PARTICLES CONCENTRATION IN TURBULENT CHANNEL FLOW

Dmitrii Ph. Sikovsky^{1,2},
dphs@mail.ru

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Acad. Lavryentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the wide spread of turbulent particle-laden flows in different technical equipment and facilities used in extraction of mineral resources, transportation technologies, energy engineering and other branches of industry. The examples are the pneumatic transport systems for powders, tunnels of underground excavations, gas pipes of boiler houses and metal-lurgy plants, ventilation channels of plants, steam pipelines and other elements of steam power plants etc. The important role of particle-laden flows in nature and human activities dictates the necessity of the study of key mechanisms of the particle-wall interaction and the development of the advanced engineering turbulence models for two-phase flows.

The main aim of the study is to obtain the analytical expression for particle concentration in turbulent channel flow between two plates from the asymptotic analysis of the kinetic equation for probability density function of particle velocity and position and the classical scaling theory of wall turbulence; analysis of finite particle size effect on accumulation of particles in viscous sublayer of wall turbulence.

The methods: the asymptotic analysis of kinetic equation for probability density function of particle velocity and position; Chapman–Enskog method for finding a solution of the kinetic equation; scaling and dimensional arguments.

The results. The authors have carried out the asymptotic analysis of the kinetic equation for probability density function of particle velocity and position for turbulent particle-laden flow in a plane channel. General forms of the expressions for concentrations of particles are obtained for viscous sublayer, logarithmic and outer layer. The authors proposed a new particle accumulation criterion. The analytical expression was obtained for this criterion. The expression shows the drastic increase of particle concentration in the viscous sublayer when increasing the Stokes number from 1 to 27, which is in good agreement with the data of DNS/Lagrangian tracking simulations. It is shown that the increase of particle size attenuates the particle accumulation. The analytical expression for concentration of particles in the viscous sublayer is derived. It is in good agreement with the data of DNS/Lagrangian tracking simulations.

Key words:

Turbulence, particle-laden flows, particle accumulation, scaling laws, statistical modeling.

The research was carried out on the account of the Russian Science Foundation Grant (project no. 14–19–01685).

REFERENCES

- Li Z., Wei J., Yu B. Analysis of interphase forces and investigation of their effect on particle transverse motion in particle-laden channel turbulence. *Int. J. Multiphase Flow*, 2017, vol. 88, pp. 11–29.
- Zaichik L.I., Alipchenkov V.M., Sinaiski E.G. *Particles in turbulent flows*. Germany, Wiley-VCH Verlag, 2008. 297 p.
- Reeks M.W. Transport, mixing and agglomeration of particles in turbulent flows. *Flow Turb. Comb.*, 2014, vol. 92, pp. 3–25.
- Caporaloni M., Tampieri F., Trombetti F., Vittori O. Transfer of particles in nonisotropic air turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 1975, vol. 32, pp. 565–568.
- Friedlander S.K., Johnstone H.F. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams. *Ind. Eng. Chem.*, 1957, vol. 49, pp. 1151–1156.
- Narayanan C., Lakehal D., Botto L., Soldati A. Mechanism of the particle deposition in a fully developed turbulent open channel flow. *Phys. Fluids*, 2003, vol. 15, pp. 763–775.
- Soldati A., Marchioli C. Physics and modelling of turbulent particle deposition and entrainment: Review of a systematic study. *Int. J. Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, pp. 827–839.
- Sikovsky D.Ph. Singularity of inertial particle concentration in the viscous sublayer of wall-bounded turbulent flows. *Flow Turb. Combust.*, 2014, vol. 92, pp. 41–64.
- Sikovsky D.Ph. Stochastic Lagrangian Simulation of Particle Deposition in Turbulent Channel Flows. *Flow Turb. Combust.*, 2015, vol. 95, pp. 561–582.
- Sikovsky D.Ph. Deposition of inertial particles from turbulent flow in channels at high Reynolds numbers. *Thermophysics and aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 235–254.
- Monin A.S., Yaglom A.M. *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*. New York, Dover, 2007. Vol. 1, 689 p.
- Marusic I., McKeon B.J., Monkewitz P.A., Nagib H.M., Smits A.J., Sreenivasan K.R. Wall-bounded turbulent flows at high Reynolds numbers: Recent advances and key issues. *Phys. Fluids*, 2010, vol. 22, pp. 065103–1–24.
- Townsend A.A. *The structure of turbulent shear flow*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1976. 428 p.
- Van Dyke. M. *Perturbation methods in fluid mechanics*. New York, Academic Press, 1964. 229 p.
- Sikovskii D.F. Relations for Particle Deposition in Turbulent Gas-Particle Channel Flows. *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, pp. 74–84.
- Marchioli C., Soldati A. Mechanisms for particle transfer and segregation in turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 2002, vol. 468, pp. 283–315.
- Swales D.C., Darbyshire K.F.F. A generalized Fokker-Planck equation for particle transport in random media. *Physica A*, 1997, vol. 242, pp. 38–48.
- Swales D.C., Sergeev Y.A., Parker A. Chapman–Enskog closure approximation in the kinetic theory of dilute turbulent gas-particle suspensions. *Physica A*, 1998, vol. 254, pp. 517–547.
- Belan S. Concentration of diffusional particles in viscous boundary sublayer of turbulent flow. *Physica A*, 2016, vol. 443, pp. 128–136.

20. Belan S., Chernykh A., Lebedev V., Falkovich G. Inelastic collapse and near-wall localization of randomly accelerated particles. *Phys. Rev. E*, 2016, vol. 93, pp. 052206–1-6.
21. Belan S., Fouxon I., Falkovich G. Localization-delocalization transitions in turbophoresis of inertial particles. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 112, pp. 234502.
22. Fornari W., Formenti A., Picano F., Brandt L. The effect of particle density in turbulent channel flow laden with finite size particles in semi-dilute conditions. *Phys. Fluids*, 2016, vol. 28, pp. 033301–1-19.
23. Marchioli C., Soldati A., Kuerten J.G.M., Arcen B., Taniere A., Goldensoph G., Squires K.D., Cargnelutti M.F., Portela L.M. Statistics of particle dispersion in direct numerical simulations of wallbounded turbulence: Results of an international collaborative benchmark test. *Int. J. Multiphase Flow*, 2008, vol. 34, pp. 879–893.
24. Pallares J., Vernet A., Grau F.X. Effect of the instantaneous turbulent flow structures on the particle distribution near the wall of a channel. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 2014, vol. 46, pp. 144–153.

Received: 29 November 2017.

Information about the authors

Dmitrii Ph. Sikovsky, Cand. Sc., senior researcher, Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

УДК 666.94.015.42:536.6

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧАСТИЦ ЦЕМЕНТА С ВОДОЙ ИЛИ ВАРИАНТ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТА

Лотов Василий Агафонович,

valotov@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью углубления теоретических представлений о механизме взаимодействия цемента с водой с целью более эффективного использования портландцемента.

Цель исследования: определить поведение системы цемент–вода при гидратации и твердении с помощью микрокалориметра новой конструкции.

Объект исследования: портландцемент ЦЕМ 1 42,5 Б (М500 Д0).

Методы исследования: термодинамический анализ системы цемент–вода на основе уравнения Гиббса, являющегося объединённым выражением первого и второго законов термодинамики; калориметрические исследования системы цемент–вода с использованием оригинальной конструкции дифференциального микрокалориметра; магнитодинамический метод контроля акустических колебаний в системе цемент–вода.

Результаты исследования. Показана возможность использования основного закона термодинамики при выявлении механизма процессов гидратации и твердения цемента. Установлено, что тепло, выделяемое цементом при гидратации, расходуется на диспергирование частиц цемента до наноразмерного состояния. Основная роль в процессе диспергирования принадлежит поверхностному и приповерхностному протонированию минеральных частиц цемента. Формирование структуры цементного камня начинается с момента объединения наноразмерных частиц в процессе их объединения и перехода в более плотное состояние, в результате чего в твердеющей системе появляется свободный объём и свободная выделенная вода, которая вступает во взаимодействие с негидратированной поверхностью зёрен цемента и такой цикл взаимодействия цемента с водой повторяется в течение всего длительного периода твердения цемента и формирования структуры цементного камня. Диспергирование частиц цемента сопровождается акустическими колебаниями в системе частотой от 3–100 Гц до 20 кГц с интенсивностью низкочастотных колебаний в диапазоне 3–10 децибел. Различные периоды гидратации сопровождаются колебаниями различной интенсивности.

Ключевые слова:

Цемент, гидратация, диспергирование частиц, твердение, тепловыделение, индукционный период, энергия Гиббса, энтальпийный и энтропийный факторы, микрокалориметрия, генерация акустических колебаний.

Введение

До настоящего времени многие проблемы механизма процессов гидратации и твердения цемента являются дискуссионными и нет однозначных ответов на возникающие вопросы по этим проблемам [1–14].

Выявление механизмов гидратации и твердения цемента имеет исключительно важное значение для понимания процессов превращения клинкерных минералов сначала в коллоидное и даже в нанодисперсное состояние, а затем снова в кристаллическое состояние. Это понимание необходимо для осознанного и обоснованного выбора внешнего энергетического воздействия на систему цемент–вода, особенно на ранней стадии гидратации цемента, когда начинают развиваться стартовые процессы формирования структуры и прочности цементного камня. Выбор этих воздействий базируется на использовании уравнения Гиббса, являющегося выражением объединённого уравнения первого и второго законов термодинамики:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = P\Delta V + \sigma\Delta s + \mu\Delta n + \varphi\Delta q - T\Delta S,$$

где ΔG , ΔH , $T\Delta S$ – соответственно изменение свободной энергии Гиббса, энтальпийного и энтропийного факторов системы цемент–вода при переходе из начального состояния в конечное; $P\Delta V$ – работа, совершаемая системой при изменении объёма, или энергия, необходимая для производ-

ства этого изменения; $\sigma\Delta s$ – работа, совершаемая системой при образовании новой поверхности, или энергия, выделяемая или поглощаемая при производстве этого изменения; $\mu\Delta n$ – работа, совершаемая системой, или энергия, выделяемая или поглощаемая при образовании новых химических соединений и взаимопревращений количества вещества в системе, а также изменений ее фазового состава; $\varphi\Delta q$ – работа, совершаемая системой при изменении ее электрического потенциала и количества электричества в процессе изменения ионного состава жидкой или твердой фазы, при диспергировании и образовании новой поверхности.

Все члены этого уравнения являются произведением векторной величины на скалярную и имеют размерность работы или энергии, находятся в тесной взаимосвязи, что предполагает взаимопревращение различных видов энергии.

Действие составляющих энтальпийного фактора проявляется сразу после соприкосновения цемента с водой, при котором резко снижается поверхностное натяжение твердой фазы, сопровождаемое выделением теплоты смачивания, инициирующей развитие реакций гидролиза трёхкальцевого силиката ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Обменное разложение веществ водой приводит к смещению равновесия в ионном составе диссоциированных молекул воды за счет активного связывания гидроксидно-

нов при образовании гидроксида кальция и увеличения концентрации ионов водорода (протонов). Реакции гидролиза являются своеобразным энергетическим толчком для начала развития процессов гидратации цемента.

В начальный период гидратации образуются частицы молекулярного уровня дисперсности (1–5 нм) [15], состоящие не менее чем из трех молекул, когда они приобретают свойства фазы. Частицы такого уровня дисперсности при различном химическом составе имеют общий признак – развитую поверхность, которая составляет 350–450 м²/г и более [16, 17]. При истинной плотности первичных продуктов гидратации 1,5–2,2 г/см³, расчётный среднеповерхностный размер этих частиц составляет 5–10 нм.

Образование первичных гидратированных частиц нанодисперсного размера и последующего их объединения за счет срастания в условиях появляющегося стесненного состояния является наиболее общим признаком проявления вяжущих свойств у всех вяжущих систем. С момента объединения первичных частиц начинается формирование сначала коагуляционной, а затем и кристаллизационной структуры цементного камня.

Образование первичной нанодисперсной системы при гидратации цемента подтверждается и характером термокинетической зависимости (рис. 2). Первый, наиболее интенсивный максимум тепловыделения обусловлен уменьшением поверхностной энергии твердой фазы и выделением теплоты смачивания. Свой вклад в это тепловыделение вносят процессы гидролиза $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, гидратации других минералов и образования ионов гидроксония по схеме: $\text{H}_2\text{O}+\text{H}^+\rightarrow(\text{H}_3\text{O})^++770\text{ кДж/г}\cdot\text{ион}$. Длительность этого тепловыделения зависит от массы смачиваемой навески цемента и составляет примерно 1 ч, что сопоставимо с длительностью начальных сроков схватывания цемента. Начало схватывания цементного теста обусловлено появлением достаточного количества нанодисперсных гидратированных частиц, которые связывают значительную часть воды затворения, что проявляется в увеличении пластичности цементного теста и его пластической прочности. В период до конца сроков схватывания происходит адсорбционное связывание практически всей воды затворения, в результате чего система цемент–вода приобретает твердообразное состояние и значительную прочность. Движущая сила реакций взаимодействия клинкерных минералов с водой предопределяется величиной суммарного теплового эффекта двух составляющих: теплового эффекта гидратации Q_r и теплового эффекта разрушения и диспергирования кристаллической решетки минералов Q_d :

$$\Delta Q=Q_r+(-Q_d).$$

Теплота гидратации является положительной, так как образование связи между двумя ионами всегда сопровождается уменьшением энтальпии (экзотермический процесс). Процесс разрушения и диспергирования кристаллической решетки, со-

провожающийся разрывом связей в кристалле, всегда связан с поглощением тепла (эндотермический процесс), и величина Q_d будет отрицательной. Если $Q_r>Q_d$, то $\Delta Q>0$ и избыток тепла расходуется на повышение температуры системы цемент–вода, что и наблюдается при смачивании цемента водой. При диспергировании кристаллов тепло, затрачиваемое на разрушение кристаллической решетки, превосходит теплоту гидратации, $\Delta Q<0$ и температура системы понижается.

Методика эксперимента

Из вышеизложенного следует, что процесс взаимодействия цемента с водой обусловлен выделяющимся при гидратации теплом, которое расходуется на диспергирование частиц в течение длительного времени и увеличением энтропии системы [18]. Чтобы понять механизм этого взаимодействия необходимо контролировать изменение температуры системы в процессе этого взаимодействия. Использовать для этой цели существующие конструкции микрокалориметров не корректно, так как они позволяют только определить суммарное (интегральное) количество тепла, выделяемое системой ($Q=f(\tau)$) [19, 20]. Дифференциально-термический метод анализа (ДТА) или дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) позволяют контролировать разность температур между пробой и эталоном при непрерывном увеличении температуры ($\Delta T=f(T)$). Принцип ДТА использован нами в конструкции дифференциального микрокалориметра (ДМК) [21, 22], позволяющего контролировать разность температур между калориметрическими ячейками во времени ($\Delta T=f(\tau)$). Схема ДМК представлена на рис. 1 и содержит две калориметрические ячейки (КЯ), в которые засыпается сухой цемент в количестве 0,5–1 г, а затем в одну из КЯ вводится расчётное количество воды для обеспечения равенства масс обеих ячеек.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В своих экспериментах в эталонную ячейку вводилось 1,35 г цемента, а в испытательную – 1 г цемента и 0,35 г дистиллированной воды. Преимуществом предложенной ДМК является возможность определения разности температур между КЯ с момента контакта воды с цементом в испытательной ячейке. На рис. 2, а, представлено изменение разности температур в системе цемент–вода при гидратации и твердении в течение трёх суток. В отличие от зависимостей тепловыделения, представленных в [19–20], зависимость, представленная на рис. 2, показывает изменение разности температур между эталонной и испытательной ячейками ДМК и периодичность происходящих процессов. Из этого следует, что контроль за изменением температур при гидратации и твердении цемента необходимо проводить по разности температур между сухим (эталон) и влажным (проба) материалом. Контроль за интегральным тепловыделением даёт менее точные результаты.

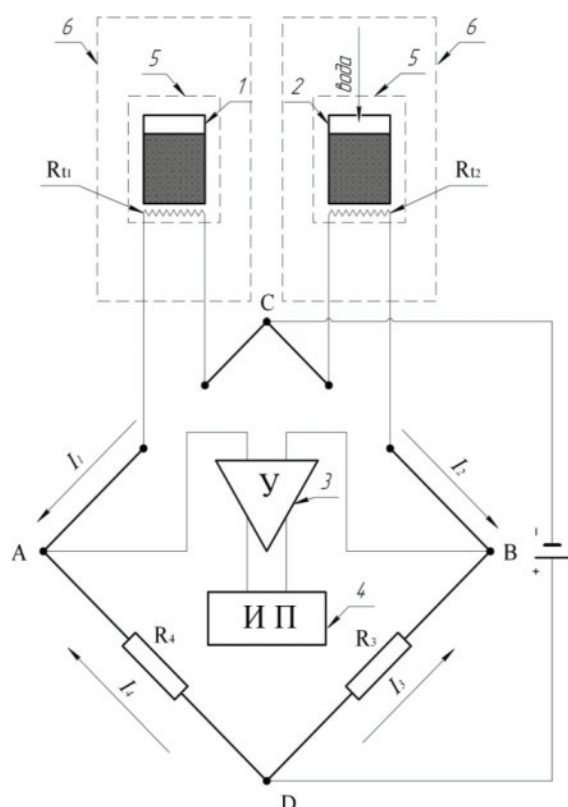


Рис. 1. Схема дифференциального микрокалориметра: 1, 2 – калориметрические ячейки; R_{t1} , R_{t2} – термометры сопротивления; 3 – усилитель сигнала; 4 – измерительный прибор; 5, 6 – термостаты

Fig. 1. Scheme of differential microcalorimetry: 1, 2 are the calorimetric cells; R_{t1} , R_{t2} are the resistance thermometers; 3 is the amplifier; 4 is the measuring instrument; 5, 6 are the thermostats

Периодичность процессов выделения и поглощения тепла в системе цемент–вода не позволяет регистрировать тепловыделение через 1,5–2 суток на микрокалориметрах известных конструкций (типа Кальве), так как в этих конструкциях заложен принцип суммирования выделившегося и поглощенного тепла. Математически это можно представить так:

$$Q = ((+\Delta Q) + (-\Delta Q)) \approx 0.$$

Единство и противоположность параметров процессов гидратации и диспергирования проявляется в характере первого максимума кривой тепловыделения (рис. 2, а), в котором после интенсивного выделения тепла в первые 4–5 мин (масса навески цемента 1 г, В/Ц=0,35) начинают преобладать процессы, связанные с затратой тепла на диспергирование, и это тепло практически полностью поглощается системой цемент–вода в течение 50 мин, в результате чего общая продолжительность этого периода тепловыделения составляет около 1 ч. Тем не менее, процессы диспергирования на этом не заканчиваются и продолжают в индукционном периоде гидратации за счет дополнительного поглощения тепла у системы.

Практически горизонтальный характер зависимости тепловыделения в индукционном периоде свидетельствует о равенстве тепловых эффектов гидратации и диспергирования ($\Delta H = T\Delta S$, $\Delta G = 0$ – состояние термодинамического равновесия), и именно в этом периоде образуется значительное количество первичных нанодисперсных продуктов гидратации цемента. В этом периоде всё тепло гидратации полностью расходуется на диспергирование частиц цемента, а по характеру зависимости тепловыделения можно ошибочно прийти к выводу, что в системе полностью прекращается течение процессов гидратации.

Измерительная схема ДМК позволяет контролировать изменение температуры материала в измерительной ячейке с высокой точностью. Эта термограмма свидетельствует о цикличности процессов гидратации и твердения цемента.

Образовавшиеся в первые 4,5–5 ч продукты гидратации с плотностью около 1,5–2,2 г/см³ перекристаллизуются в продукты с плотностью 2,5–2,6 г/см³, в результате чего в системе появляется свободный объём и свободная вода, которая при стимулирующем воздействии тепла кристаллизации вновь вступает во взаимодействие с ещё негидратированным цементом и после этого цикл повторяется примерно через 1 сутки.

Масштаб измерений предопределяется величиной первого максимума разности температур (тепловыделения при смачивании). Поэтому, чтобы показать возможности нового ДМК, проведена повторная съёмка тепловыделения с раздельным измерением изменения температур в период смачивания, в индукционный период и в период до 96 часов развития процессов гидратации и твердения цемента. Эти термограммы представлены на рис. 3–5.

После контакта цемента с водой интенсивное тепловыделение наблюдается в течение первых 3-х минут, а затем выделившееся тепло начинает расходоваться на диспергирование. Длительность первого индукционного периода, в течение которого температура системы понижается на 0,18 °С, составляет около 2-х часов, а затем в течение 1 ч остаётся постоянной и равной 0,41–0,42 °С.

Взаимосвязанное протекание процессов гидратации и диспергирования цемента приводит к увеличению полной свободной поверхностной энергии системы (U_F), которая складывается из энергии Гиббса (единицы поверхности) и скрытой теплоты образования единицы новой поверхности [23]:

$$U_F = \sigma + q_F = G_F + T \cdot S_F,$$

где σ – удельная свободная поверхностная энергия, $\sigma = dG/dF$; G_F – энергия Гиббса единицы поверхности; q_F – скрытая теплота образования единицы новой поверхности; S_F – избыточная энтропия единицы поверхности; T – температура.

Образование первичных нанодисперсных продуктов имеет исключительно важное значение для стабильного развития во времени процесса гидра-

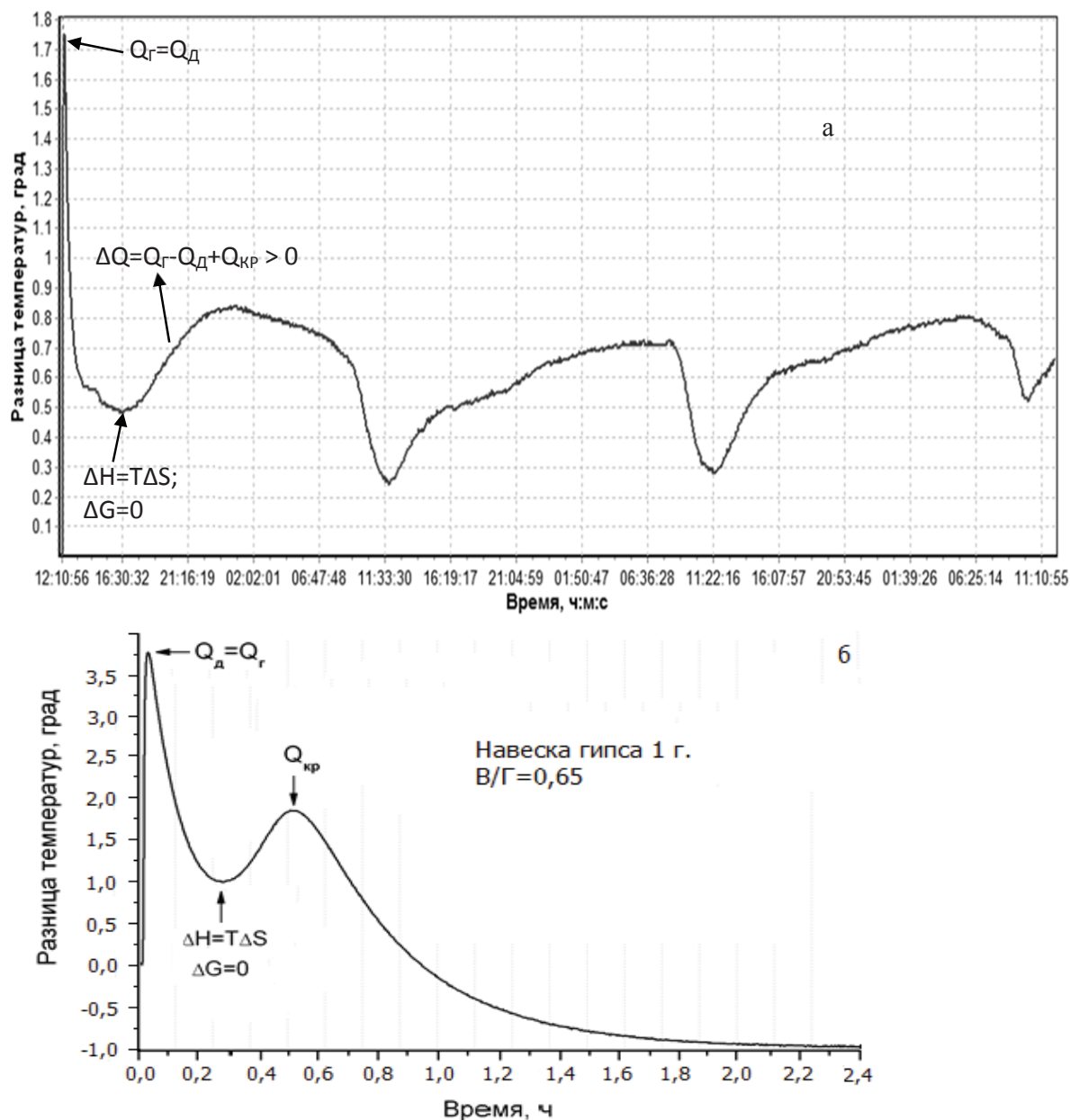


Рис. 2. Изменение разности температур между калориметрическими ячейками при гидратации и твердении: а) цемента в течение 3-х суток; б) полуводного гипса

Fig. 2. Change of temperature difference between the calorimetric cells at hydration and hardening of: а) cement within 3 days; б) semi-aquatic gypsum

тации цемента, так как при диспергировании увеличивается степень беспорядка в системе ($\Delta S > 0$) и течение процесса гидратации обеспечивается энтропийным фактором. В то же время если бы течение процесса гидратации цемента обеспечивалось только энтропийным фактором, наблюдалось бы уменьшение температуры системы. В действительности, такой процесс не наблюдается, и после некоторого снижения температуры системы в индукционном периоде (преобладание энтропийного фактора), через 4–6 ч после соприкосновения цемента с водой, температура системы вновь начина-

ет увеличиваться за счет выделения тепла кристаллизации ($Q_{кр}$) при объединении первичных частиц в более крупные и стабильные агрегаты, а также тепла, выделяющегося при взаимодействии диполей и ионов воды с ещё негидратированной поверхностью частиц клинкерных минералов (преобладание энтальпийного фактора). В этот период часть тепла, выделенного системой, также расходуется на процессы диспергирования, тем не менее, разность теплот остаётся положительной, т. е. $\Delta Q = Q_{кр} + Q_r - Q_d > 0$. Необходимо отметить, что действие энтальпийного и энтропийного факторов

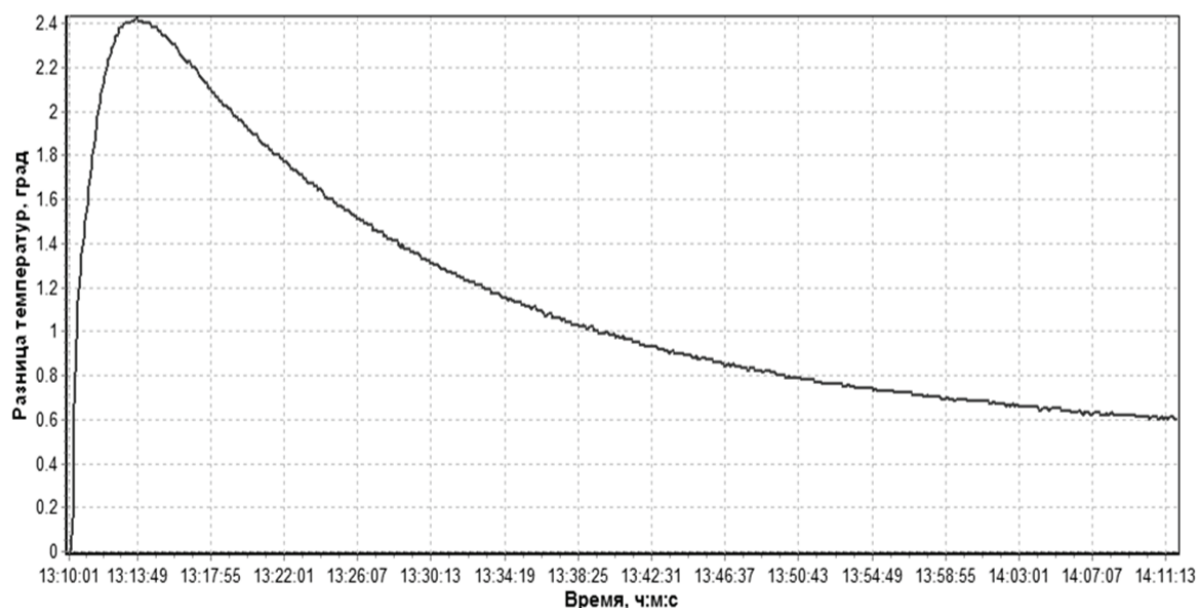


Рис. 3. Изменение разницы температур в период смачивания в системе цемент–вода в течение 1 ч (температура окружающей среды – 23 °С)

Fig. 3. Change of temperature difference in the period of wetting in the cement–water system for 1 h (ambient temperature is 23 °C)

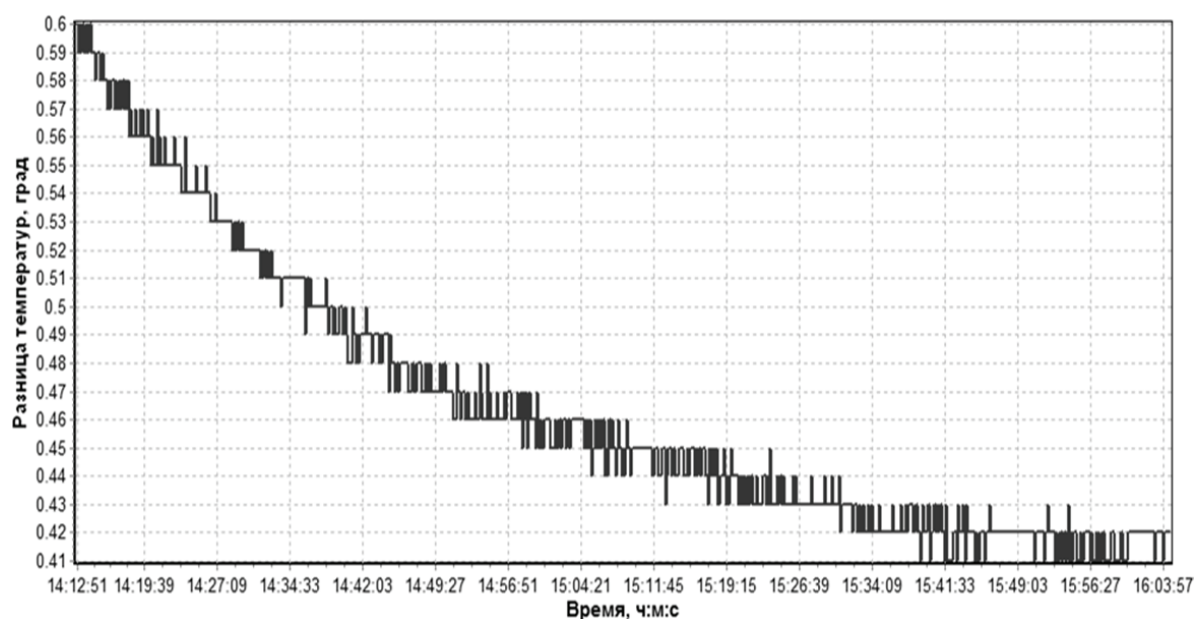


Рис. 4. Особенности изменения температуры системы цемент–вода в индукционном периоде

Fig. 4. Features of temperature change in the cement–water system in induction period

проявляется и при гидратации полуводного гипса, у которого после образования в индукционном периоде двуводного гипса и последующей его кристаллизации система гипс–вода переходит в стабильное состояние за более короткий период по сравнению с системой цемент–вода (рис. 2, б).

Соотношение значений энтальпийного и энтропийного факторов в системе цемент–вода обеспечивает отрицательное значение энергии Гиббса в течение длительного времени процесса гидратации, а различные по знаку тепловые эффекты про-

цессов объединения нанодисперсных частиц (+) и поверхностного диспергирования зерен цемента (–), а также протекания эндо- и экзотермических реакций образования гидратированных продуктов стимулируют автоколебательное течение реакций взаимодействия клинкерных минералов с водой, включая индукционный и последующие периоды гидратации цемента.

Необходимо отметить, что диспергирование частиц цемента происходит в основном за счет протонирования приповерхностных и поверхностных

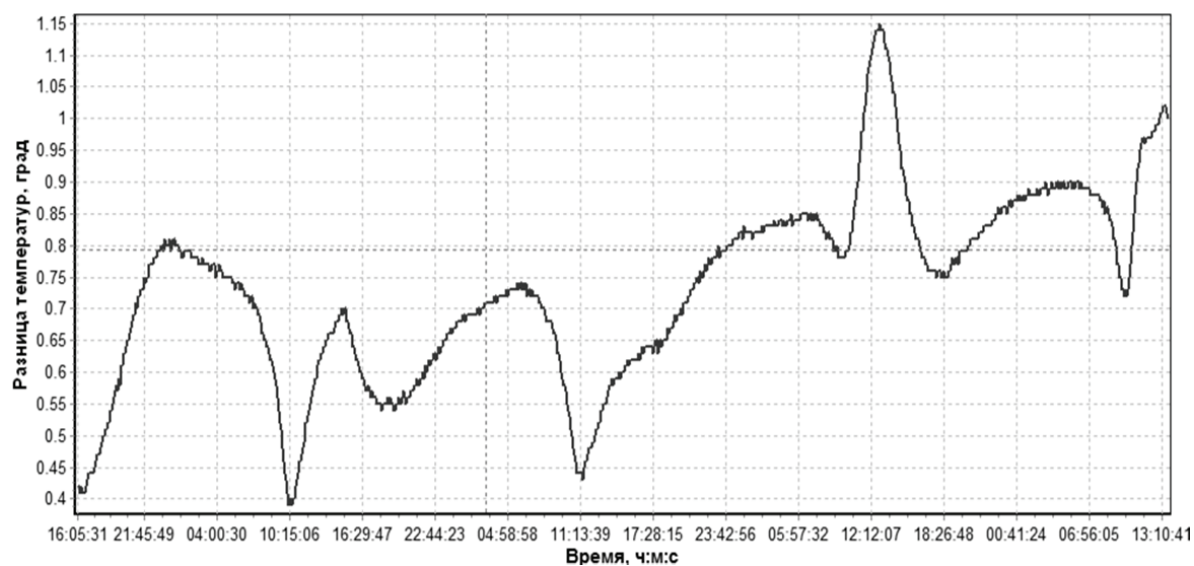


Рис. 5. Цикличность процессов гидратации и твердения цемента после индукционного периода. Общая продолжительность гидратации 96 ч

Fig. 5. Cyclical processes of cement hydration and hardening after induction period. The total duration of hydration is 96 h

слоев частиц, [24]. Протоны, образующиеся при электролитической диссоциации молекул воды, при первичном контакте с частицами цемента и при реакции гидролиза, обладают аномально высокой подвижностью – $3,26 \cdot 10^{-5}$ м/с, при напряженности электрического поля 1 в/см и высокой проникающей способностью, так как их размеры на несколько порядков (таблица) меньше размеров кристаллической решетки клинкерных минералов [25].

Таблица. Сравнительные размеры кристаллической решетки минералов и ионов

Table. Relative size of crystal lattice of minerals and ions

Минерал Mineral	Размер элементарной ячейки (молекулы), нм Size of a unit cell (molecule), nm	Минерал, ион Mineral, ion	Размер элементарной ячейки (иона), нм Size of a unit cell (ion), nm
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	0,70–2,51	CaO	0,48
$\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	0,55–1,12	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,36–0,49
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	1,53	OH^-	0,306 (диаметр)
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	0,53–1,45	H	0,106 (диаметр)
H_2O	0,27	H^+	$1,75 \cdot 10^{-6}$

Протоны, перемещающиеся к поверхности частиц цемента по эстафетному механизму и проникающие в кристаллическую решетку минералов, связываются прочной связью с электроотрицательными атомами кислорода и образуют гидроксидионы. Кроме того, протоны вступают в реакции ионного обмена с катионами минералов ($\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2\text{H}^+$ и др.), в результате чего наряду с гидроксидионами образуются аквакомплексы $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$, $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ и первичные молекулы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, размер которых сопоставим с размерами кристаллической решетки основных минералов

(табл. 1), и за счет этого происходит расклинивающее разрушение поверхностного слоя частиц цемента с образованием нанодисперсных гидратированных частиц. В работе [26] установлено, что система цемент–вода с момента соприкосновения её компонентов генерирует собственные низкочастотные колебания. Вполне вероятно, что эти колебания возникают в процессе расклинивающего разрушения поверхностного слоя частиц цемента.

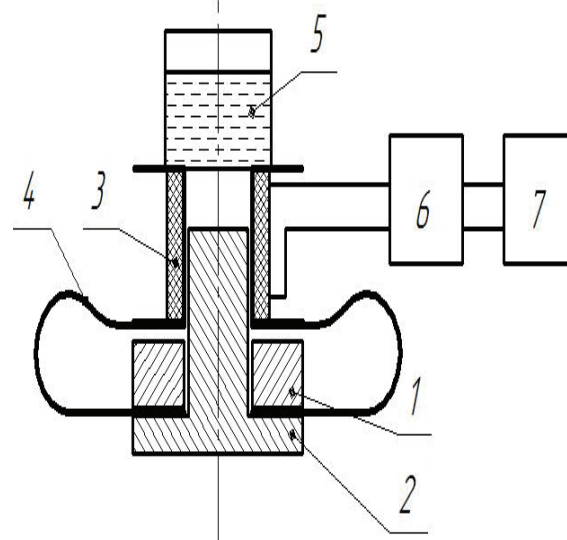


Рис. 6. Схема магнитодинамического устройства: 1 – постоянный магнит; 2 – магнетопровод; 3 – катушка; 4 – пружина; 5 – пластиковая кювета; 6 – звукозаписывающее устройство; 7 – компьютер

Fig. 6. Diagram of a magnetohydrodynamic device: 1 is the permanent magnet; 2 is the magnetic conductor; 3 is the coil; 4 is the spring; 5 is the plastic cuvette; 6 is the recording device; 7 is the computer

Наши исследования подтверждают возникновение собственных акустических колебаний в системе цемент–вода. Исследования проводили с использованием магнитодинамической системы контроля за возникающими колебаниями. На рис. 6 приведена схема экспериментальной установки, которая состоит из постоянного неодимового магнита, магнитопровода и подпружиненной катушки с медным проводом.

На катушку устанавливалась пластиковая кювета, в которую засыпался 1 г цемента и приливалось 10–12 мл дистиллированной воды ($V/C=10-12$). Возникновение акустических колебаний фиксировалось звукозаписывающим устройством. Далее сигнал подавался на компьютер, в котором обрабатывался с помощью программного обеспечения REAPTOR и выводился на монитор в виде дорожки звукового изображения. Общий вид звуковых колебаний в различное время гидратации цемента представлен на рис. 7.

Перед съёмкой акустики системы цемент–вода предварительно проверена контрольная чувствительность магнитодинамического устройства на чистой воде. Запись звуковых колебаний системы цемент–вода проводили в последние 90 с для указанного срока гидратации. Для звуковой дорожки (рис. 7, л) на рис. 7, м представлен фрагмент длительностью 2 с для более наглядного изображения вида звуковых колебаний.

Из рис. 7 следует, что начальный и последующие периоды гидратации цемента сопровождаются звуковыми колебаниями различной частоты и интенсивности, что подтверждает протекание процессов диспергирования при гидратации частиц цемента, а также при твердении продуктов гидратации цемента. Расклинивающее разрушение поверхностного слоя частиц цемента с образованием нанодисперсных гидратированных частиц сопровождается микровзрывами и звуковыми колебаниями, передающимися через несжимаемую среду (воду) сначала пластиковой кювете, а затем катушке с медным проводом, при взаимодействии которой с магнитным полем возникает электрический сигнал.

Постоянное диспергирование исходных частиц цемента ($\sigma\Delta s < 0$, $\Delta S > 0$), образование и укрупнение гидратированных частиц в период схватывания приводит к заполнению образовавшегося порового пространства системы цемент–вода и возникновению избыточного давления ($P\Delta V$) в результате увеличения объёма продуктов гидратации и возникновению стеснённого состояния (по М.М. Сычёву), которое стимулирует развитие процессов перекристаллизации первичных продуктов гидратации в более стабильное состояние с плотностью 2,4–2,6 г/см³. К концу сроков схватывания на термокинетической зависимости процесс перекристаллизации сопровождается значительным выделением тепла, и в это время происходит схватывание цементного теста и формирование достаточно прочного кристаллического каркаса цементного камня.

Содержание капиллярно-неподвижной воды (максимальная молекулярная влажность) в цементном тесте, определенное по методу влагоёмких сред [27] (сжатие лепешки цементного теста с водоцементным отношением $V/C=0,3-0,5$, толщиной 1–2 мм, помещенной между двумя пакетами фильтровальной бумаги, при давлении 6,55 МПа в течение 10 мин.), составляет в течение всего периода схватывания 12–13 % и лишь к концу сроков схватывания резко увеличивается до 17 %. Этот факт также подтверждает протекание процесса перекристаллизации и свидетельствует о том, что вода в первичных гидратированных продуктах удерживается адсорбционными силами вплоть до конца сроков схватывания, и только при перекристаллизации образуются устойчивые кристаллогидратные соединения.

Увеличение плотности продуктов гидратации при их перекристаллизации приводит вновь к появлению порового пространства в системе и несвязанной воды, которая вступает во взаимодействие с негидратированными частицами цемента, и такой цикл гидратации повторяется с затухающей интенсивностью в течение длительного времени. Исходя из этого можно сказать, что при гидратации и твердении цемента наблюдается своеобразная «перекачка» жидкости через твердую фазу, а не твёрдой фазы через жидкую, как это трактуется, например, в сквозьрастворном механизме гидратации.

Процессы гидратации и твердения цемента являются глубоко взаимосвязанными, и управлять этими процессами можно лишь на основе детального анализа механизма этих процессов. Если движущей силой процесса гидратации является разность тепловых эффектов процессов присоединения воды твердой фазой и диспергирования исходных частиц цемента, то движущей силой процесса твердения является разность объемного содержания твердой фазы ΔK_t в гидратированном K_{t_2} и негидратированном K_{t_1} цементе:

$$\Delta K_t = K_{t_2} - K_{t_1}, \quad (K_t = \rho_{\text{каж}} / \rho_{\text{ист}}),$$

так как истинная плотность гидратированных продуктов всегда меньше плотности исходного цемента. Из этого следует, что для ускорения твердения цемента необходимо интенсифицировать процесс образования первичных нанодисперсных продуктов гидратации с помощью энергетических воздействий, следующих из объединенного уравнения 1-го и 2-го законов термодинамики. В качестве примера можно назвать следующие воздействия:

- дополнительное механическое диспергирование исходного цемента – ($\sigma\Delta s$);
- уплотнение исходной системы цемент–вода – ($P\Delta V$);
- повышение неравновесного состояния клинкерных минералов – ($\sigma\Delta s$);
- увеличение диэлектрической проницаемости воды и ее растворяющей способности – ($\mu\Delta n + \sigma\Delta s$);



Вода (контроль) (а)



Гидратация цемента – 5 мин (б)



Гидратация цемента – 15 мин (в)



Гидратация цемента – 30 мин (г)



Гидратация цемента – 60 мин (д)



Гидратация цемента – 90 мин (е)



Гидратация цемента – 120 мин (ж)



Гидратация цемента – 150 мин (з)



Гидратация цемента – 180 мин (и)

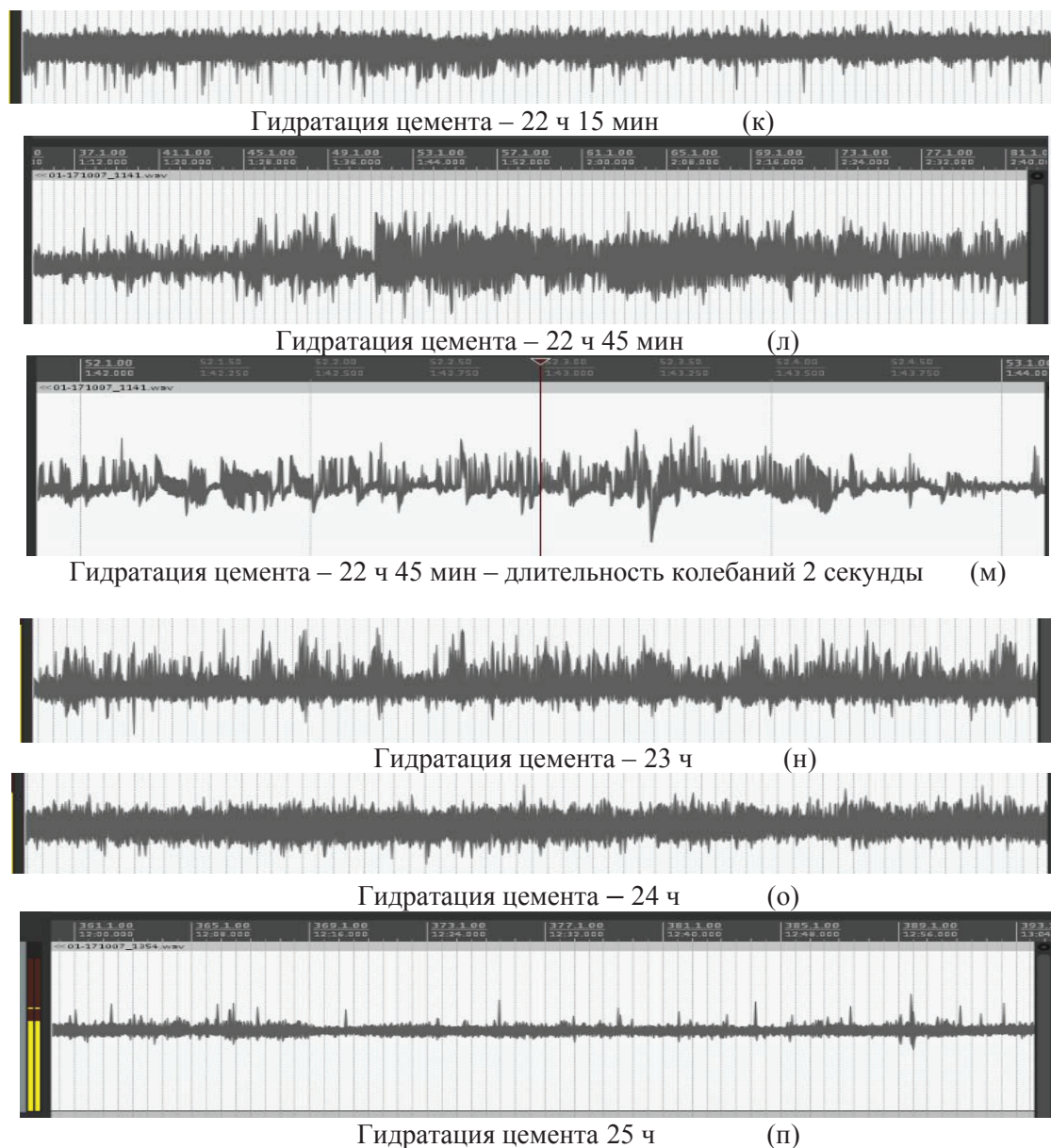


Рис. 7. Общий вид звуковых колебаний при гидратации цемента в различное время

Fig. 7. General view of sound vibrations at cement hydration at different times

- ускорение реакций гидролиза, приводящих к возникновению кислой водной среды или дополнительное протонирование системы малыми добавками кислот – $(\mu\Delta n + \varphi\Delta q)$;
- изменение ионного состава воды с помощью добавок солей – $(\mu\Delta n + \varphi\Delta q)$;
- регулирование адсорбционных свойств гидратированной твердой фазы с помощью ПАВ – $(\sigma\Delta s)$;
- реакционное связывание портландита добавками нанодисперсного кремнезёма – $(\mu\Delta n + \sigma\Delta s)$;
- электрофизическое, электрохимическое, акустическое, электромагнитное воздействие на систему – $(\varphi\Delta q)$;
- тепловое воздействие на систему – $(\mu\Delta n, T\Delta s)$.

Анализ энергетических составляющих энтальпийного и энтропийного факторов делает очевидным, а не эмпирическим, выбор возможных воздействий на систему цемент–вода при управлении сложными физико-химическими процессами, протекающими при гидратации и твердении уникального строительного материала – цемента.

Заключение

При анализе процессов гидратации и твердения, протекающих в системе цемент–вода, необходимо учитывать действие энергетических составляющих энтальпийного и энтропийного факторов в уравнении Гиббса. Все процессы, происходящие в системе цемент–вода, сопровождаются измене-

нием температуры, которая является наиболее чувствительным параметром системы и контроль её с помощью высокочувствительной дифференциальной микрокалориметрии позволяет получить ответы на достаточно сложные вопросы теории гидратации и твердения цемента. Показано, что процессы гидратации и твердения цемента сопровождаются возникновением постоянно чередующихся экзотермических и эндотермических

эффектов в течение длительного периода взаимодействия цемента с водой, что свидетельствует о периодичности процессов, протекающих в системе цемент–вода. Подтверждено, что протекание процессов гидратации и твердения цемента сопровождаются возникновением акустических колебаний частотой от 3–100 Гц до 20 кГц с интенсивностью 3–10 дБ, сопровождающих процессы диспергирования частиц цемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вовк А.И. Гидратация C₃S и структура C-S-H-фазы: новые подходы, гипотезы и данные // Цемент и его применение. – 2012. – № 3. – С. 89–92.
2. Stark J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis // Cement and Concrete Research. – 2011. – V. 41. – P. 666–678.
3. Thomas J.J. A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of tricalcium silicate hydration // Journal of American Ceramic Societies. – 2007. – V. 90. – № 10. – P. 3282–3288.
4. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration / P. Juilland, E. Galussi, R. Flatt, K. Scrivener // Cement and Concrete Research. – 2010. – V. 40. – P. 831–844.
5. Moser B. Progress in building materials analyses // ZKG (Zement Kalk Gips) International. – 2010. – № 2. – P. 63–72.
6. Jennings H.M. Colloid model of C-S-H and implication to the problem of creep and shrinkage // Journal Concrete Science and Engineering. – 2004. – V. 37. – P. 59–70.
7. Vandamme M., Ulm F.-J. Nanogranular origin of concrete creep // PNAS (Proc. of the National Academy of Sciences). – 2009. – V. 106. – № 26. – P. 10552–10557.
8. Pelleng R.J.M., Kushima A., Shahsavari R. A realistic molecular model of cement hydrates. // PNAS (Proc. of the National Academy of Sciences). – 2009. – V. 106. – № 38. – P. 16102–16107.
9. Physico-chemical mechanisms involved in the acceleration of the hydration of calcium sulfoaluminate cement by lithium ions / C.C.D. Coumes, M. Dhoury, J-B. Champenois, C. Mercier, D. Damidot // Cement and Concrete Research. – 2017. – V. 96. – P. 42–51.
10. Marchon D., Flatt R.J. Mechanisms of cement hydration // Science and Technology of Concrete Admixtures. – 2016. – № 5. – P. 129–145.
11. Pengyu Zhang, Leming Ou, Kun Liu. Hydration Mechanism of Portland Cement Prepared from Stonecoal Vanadium Slag // Procedia Environmental Sciences. – 2016. – V. 31. – P. 598–604.
12. Awoyera P.O., Akinmusuru J.O., Moncea A. Hydration mechanism and strength properties of recycled aggregate concrete made using ceramic blended cement // Cogent Engineering. – 2017. – V. 4. – Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1282667> (дата обращения: 30.11.2017).
13. Mechanical, hydration, and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements / El-H. Meziane, K. Ezziane, S. Kenai, A. Kadri // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2015. – V. 29. – Iss. 18. – P. 1987–2005. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2015.1048931> (дата обращения: 20.11.2017).
14. Effects of ferrite concentration on synthesis, hydration and mechanical properties of alite-calcium sulfoaluminate-ferrite cements / T. Duvallet, Y. Zhou, K.R. Henke, Th.L. Robl, R. Andrews // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. – 2017. – V. 6. – Iss. 2. – P. 85–110.
15. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 29–36.
16. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 340 с.
17. Рамачандаран В.С., Фельдман Р.Ф., Бодуэн Дж. Наука о бетоне. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.
18. Сердюкова А.А., Рахимбаев И.Ш. Влияние водоцементного отношения на кинетику тепловыделения цементов // Цемент и его применение. – 2012. – № 3. – С. 123–130.
19. Ушеров-Маршак А.В., Сопов В.П. Изотермическая калориметрия: стандартный метод изучения кинетики гидратации цемента // Цемент и его применение. – 2009. – № 5. – С. 106–107.
20. Завойдник Т., Рёсслер К., Людвиг Х.-М. К вопросу о замедляющем влиянии суперпластификаторов на гидратацию трёхкальциевого силиката // Цемент и его применение. – 2016. – № 1. – С. 138–143.
21. Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения: пат. Российская Федерация № 2475714, МПК G01K017/08; заявл. 22.09.2010; опубл. 20.02.2013, Бюлл. № 5. – 4 с.
22. Лотов В.А. Использование дифференциального микрокалориметра новой конструкции при исследовании тепловыделения в дисперсных системах // XV Международная конференция по термическому анализу и калориметрии в России (RTAC-2016). – Санкт-Петербург: СПбПУ, 2016. – Т. 2 – С. 428–431.
23. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: Химия, 1989. – 464 с.
24. Данилов В.В. О механизме гидратации в цементном тесте // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – Кн. 2. – С. 73–76.
25. Химия цементов / под ред. Х.Ф.У. Тейлора. – М.: Стройиздат, 1969. – 502 с.
26. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С., Кузнецова Т.В. Генерация собственных низкочастотных колебаний в системе «цемент–вода» // Техника и технология силикатов. – 2004. – № 1. – С. 29–34.
27. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.

Поступила 01.12.2017 г.

Информация об авторах

Лотов В.А., доктор технических наук, профессор кафедры технологии силикатов и наноматериалов Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 666.94.015.42: 536.6

INTERACTION OF CEMENT PARTICLES WITH WATER OR MECHANISM OF HYDRATION AND HARDENING OF CEMENT

Vasily A. Lotov,

valotov@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to deepen theoretical conceptions about the mechanism of cement water interaction for more efficient use of Portland cement.

The aim of the study is to determine the behavior of the cement–water system during hydration and hardening with microcalorimetry new design.

Object: Portland cement CEM 1 42,5 B (M500 D0).

Methods: thermodynamic analysis of the cement–water system based on Gibbs equation, which is the combined expression of the first and the second laws of thermodynamics; calorimetric studies of the cement–water system with the original design of the differential microcalorimeter; magnetodynamic method of monitoring acoustic waves in the cement–water system.

The results of the research. The paper demonstrates the possibility of using the basic law of thermodynamics in identifying the mechanism of cement hydration and hardening. It was found that the heat generated by cement hydration is consumed on dispersion of cement particles to nanoscale state. The surface and near-surface protonation of cement mineral particles play the main role in dispersing. Formation of cement stone structure begins with the unification of nanoscale particles in their recrystallization and transition to denser condition. This results in occurrence of free volume and free water in hardening system. Free water interacts with not hydrated surface of cement grains. This cement water interaction cycle is repeated throughout a long period of cement hardening and formation of cement stone structure. The dispersion of cement particles is accompanied by acoustic oscillations in the system frequency from 3–100 Hz to 20 kHz with intensity of low frequency oscillations of 3–10 decibels. Different periods of hydration are accompanied by vibrations of different intensity.

Key words:

Cement, hydration, dispersion of particles, hardening, heat generation, induction period, Gibbs energy, enthalpy and entropy factors, microcalorimetry, generation of acoustic oscillations.

REFERENCES

- Vovk A. I. Hydration of C₃S and structure of C-S-H C-phase: new approaches, hypotheses and data. *Cement and its applications*, 2012, no. 3, pp. 89–92. In Rus.
- Stark J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, pp. 666–678.
- Thomas J.J. A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of tricalcium silicate hydration. *Journal of American Ceramic Societies*, 2007, vol. 90, no. 10, pp. 3282–3288.
- Juilland P., Galussi E., Flatt R., Scrivener K. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 831–844.
- Moser B. Progress in building materials analyses. *ZKG International*, 2010, no. 2, pp. 63–72.
- Jennings H.M. Colloid model of C-S-H and implication to the problem of creep and shrinkage. *Journal Concrete Science and Engineering*, 2004, vol. 37, pp. 59–70.
- Vandamme M., Ulm F.-J. Nanogranular origin of concrete creep. *PNAS*, 2009, vol. 106, no. 26, pp. 10552–10557.
- Pelleng R.J.M., Kushima A., Shahsavari R. A realistic molecular model of cement hydrates. *PNAS*, 2009, vol. 106, no. 38, pp. 16102–16107.
- Coumes C.C.D., Dhoury M., Champenois J.-B., Mercier C., Damiot D. Physico-chemical mechanisms involved in the acceleration of the hydration of calcium sulfoaluminate cement by lithium ions. *Cement and Concrete Research*, 2017, vol. 96, pp. 42–51.
- Marchon D., Flatt R.J. Mechanisms of cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 2016, no. 5, pp. 129–145.
- Pengyu Zhang, Leming Ou, Kun Liu, Hydration Mechanism of Portland Cement Prepared from Stonecoal Vanadium Slag. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, vol. 31, pp. 598–604.
- Awoyera P.O., Akinmusuru J.O., Moncea A. Hydration mechanism and strength properties of recycled aggregate concrete made using ceramic blended cement. *Cogent Engineering*, 2017, vol. 4, Iss. 1. Available at: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1282667> (accessed 30 November 2017).
- Meziane El-H., Ezziene K., Kenai S., Kadri A. Mechanical, hydration and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2015, vol. 29, Iss. 18, pp. 1987–2005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2015.1048931> (accessed: 20 November 2017).
- Duvallet T., Zhou Y., Henke K.R., Robl Th.L., Andrews R. Effects of ferrite concentration on synthesis, hydration and mechanical properties of alite-calcium sulfoaluminate-ferrite cements. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2017, vol. 6, Iss. 2, pp. 85–110.
- Ratinov V.B., Rosenberg T.I. *Dobavki v beton* [Additive in concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ, 1989. pp. 29–36.
- Butt Y.M., Sychev M.M., Timashev V.V. *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov* [Chemical technology of binding materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 340 p.
- Ramachandran V.S., Feldman R.F., Beaudoin J. *Nauka o betone* [The science of the concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ, 1986. 278 p.
- Serdyukova A.A., Rakhimbayev I.S. Influence of water–cement ratio on the kinetics of heat generation of cements. *Cement and its applications*, 2012, no. 3, pp. 123–130. In Rus.
- Usherov-Marshak A.V., Sopov V.P. Isothermal calorimetry standard method for the study of kinetics of cement hydration. *Cement and its applications*, 2009, no. 5, pp. 106–107. In Rus.
- Zavodnik T., Ressler K., Ludwig H.-M. On retarding effect of superplasticizers on hydration of tricalcium silicate. *Cement and its applications*, 2016, no. 1, pp. 138–143. In Rus.

21. Lotov V.A., Ivanov Yu.A. *Differentsialny mikrokolorimetr i sposob izmereniya teplovydeleniya* [Differential microcalorimeter and a way to measure heat dissipation]. Patent RF no. 2475714, 2010.
22. Lotov V.A. Ispolzovanie differentsialnogo mikrokolorimetra novoy konstruksii pri issledovanii teplovydeleniya v dispersnykh sistemakh [Use of differential microcalorimetry of new design in study of heat generation in disperse systems]. *XV Mezhdunarodnaya konferentsiya po termicheskomu analizu i kalorimetrii v Rossii* [International Conference on Thermal Analysis and Calorimetry in Russia (RTAC-2016)]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2016. Vol. 2, pp. 428–431.
23. Frolov Yu.G. *Kurs kolloydnoy khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 464 p.
24. Danilov V.V. O mekhanizme gidratatsii v tsementnom teste [On mechanism of hydration in cement paste]. *Shestoy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa* [Sixth international Congress on cement chemistry]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. Vol. 2, B. 2, pp. 73–76.
25. *Khimiya tsementa* [Cements chemistry]. Ed. by H.F.W. Taylor. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969. 502 p.
26. Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Kuznetsova T.V. Generatsiya sobstvennykh nizkochastotnykh kolebaniy v sisteme «tsement–voda» [Generation of low-frequency oscillations in the «cement–water» system]. *Technique and technology of silicates*, 2004, no. 1, pp. 29–34.
27. Lomtadze V.D. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy* [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Leningrad, Nedra Publ., 1990. 328 p.

Received: 1 December 2017.

Information about the authors

Vasily A. Lotov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.41, 550.42, 550.461

ОЗЕРО ЭБЕЙТЫ, РОССИЯ: ХИМИКО-ОРГАНИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Колпакова Марина Николаевна^{1,2},
marina.kolpakova@gmail.com

Гаськова Ольга Лукинична^{1,3},
gaskova@igm.nsc.ru

Наймушина Ольга Сергеевна¹,
olgnaim@mail.ru

Кривоногов Сергей Константинович¹,
s_krivanogov@mail.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Национальный исследовательский Новосибирский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения и мониторинга эколого-геохимического состояния озера Эбейты, являющегося комплексным месторождением минеральных солей. Общие промышленные запасы сульфата натрия (мирабилита) в рапе озера составляют 36,89 млн т. Кроме того, это озеро представляет интерес как месторождение лечебных грязей, а также является местом обитания большой популяции рачков *Artemia salina* L. и их цист, используемых в медицинских, косметических и сельскохозяйственных целях.

Цель работы: изучить особенности макро-, микрокомпонентного, органического и минерального состава оз. Эбейты, а также гидрогеохимические процессы, влияющие на распределение органоминеральных комплексов металлов.

Методы исследования. Полевое опробование воды и донных отложений озера проводилось в летний период 2015 г. В ходе лабораторных исследований химический состав поверхностных и поровых вод, а также донных осадков определяли с использованием масс-спектральных методов, методов атомной абсорбции, пламенной-эмиссии, потенциометрии, титрования и т. д. Изучение минеральных фаз проводилось с использованием рентгенофазового анализа на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-4 (излучение CuK_α , графитовый монохроматор). Дифракционные картины были отсканированы в интервале 2θ от 3° до 65° с шагом $0,05^\circ$, время сканирования в точке – 4 с, щель $0,5$ мм.

Результаты исследований показали, что озеро Эбейты относится к $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ составу, pH озера в период опробования составлял 5,7, для озера характерна восстановительная обстановка. Поровые воды донных отложений не отличаются по макрокомпонентному составу от озерных вод, однако концентрации микроэлементов в 2–8 раз превышают значения для поверхностных вод. Основной фазой илистых донных осадков является кварц, обнаружены примеси NaCl, малые примеси кпш, плагиоклаза и кальцита. Солевые выцветы вдоль озера представлены тенардитом, небольшим/средним количеством галита и следами астраханита. Моделирование процессов комплексобразования элементов в озерной воде показало, что большая часть железа, меди, урана и тория связана с высокомолекулярным органическим веществом, что позволяет говорить о невозможности образования таких минералов, как гетит, хлорит и Si (мет), полученных в ходе проведения термодинамических расчетов без учета влияния гумусовых кислот. Полученные в ходе моделирования результаты позволили выстроить последовательность формирования эвапоритовых минералов в озере: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaCl} + \text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Ключевые слова:

Соленые озера, Эбейты, химический состав, донные отложения, гумусовые кислоты, термодинамическое моделирование, HCh; MINTEQA.

Введение

Озеро Эбейты ($54^\circ 40' \text{N}$ $71^\circ 45' \text{E}$), расположенное в лесостепной части юга Западной Сибири, на территории Омской области, является слабо изученным замкнутым водоемом: на данный момент существуют лишь данные 50–60-х гг. [1, 2], а также несколько публикаций, описывающих в основном пространственно-временные изменения уровня воды озера [3–5]. Известно, что глубина илово-солевых отложений в озере достигает 6 м [4] и что оно является сульфатным, но детального изучения хи-

мического состава, а также оценки эколого-геохимического состояния озера, являющегося комплексным месторождением минеральных солей, не проводились. Общие промышленные запасы сульфата натрия (мирабилита) в рапе озера составляют 36,89 млн т. Кроме того, это озеро представляет интерес как месторождение лечебных грязей, а также является местом обитания большой популяции рачков *Artemia Salina* L. и их цист, используемых в медицинских, косметических и сельскохозяйственных целях.

В связи с этим целью статьи явилось изучение особенностей макро-, микрокомпонентного, органического и минерального состава оз. Эбейты, а также гидрогеохимических процессов, влияющих на распределение органоминеральных комплексов металлов.

Объект изучения

Озеро Эбейты находится в зоне недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности [6]. Длина озера варьирует от 12 до 13,5 км, ширина – от 7 до 11,5 км, длина береговой линии составляет в среднем 34 км (рис. 1). Глубина озера также подвержена значительным колебаниям от 0,6 до 3 м. Площадь водосбора озера 2010 км² [7]. Водосборная территория озера находится в лесостепном ландшафте с максимально возможным суммарным испарением 600–700 мм/год. Годовая сумма осадков колеблется от 265 до 300 мм, годовой сток – 15 мм/год. Количество дней ледостава оз. Эбейты составляет в среднем 115 дней, толщина льда достигает 1 см (в третьей декаде марта). В мягкие зимы продолжительность ледостава на оз. Эбейты составляет 16 дней. Приходная часть водного баланса озера складывается в основном из талых снеговых вод (60–80 %), а также из дождевых (13–28 %) и грунтовых вод (3–6 %).

Озеро является бессточным, а его котловина представляет собой плоское понижение рельефа. Для таких неглубоких озер колебания уровня и

объема водной массы обнаруживаются в очень короткие сроки, т. е. изменения площади водной поверхности и глубины выражены намного более четко, чем на крупных, глубоких водоемах. В зависимости от водообильности года площадь озера часто варьирует и в настоящее время изменяется от 90 до 113 км². В 1998–2000 гг. Омской геолого-разведочной экспедицией были проведены ревизионные работы в акватории оз. Эбейты, в ходе которых было установлено, что гидрохимическая обстановка озера значительно изменилась за последние 50 лет. Озеро обмелело, минерализация возросла в 2–2,5 раза [7].

Методы

Отбор проб воды и методы анализов

Отбор проб воды озера проводился в теплый период года в дневное время суток. Воды для общего химического анализа отбирались в чистые полиэтиленовые емкости объемом 1,5 л без попадания воздуха на глубину 30–40 см от поверхности воды. Для ИСП-МС пробы отбирались в 15 мл емкости и подкислялись HNO₃ марки ОСЧ (перегнанная) до pH 2 в полевых условиях на месте опробования. Все пробы отбирались в двух экземплярах и фильтровались через фильтры «синяя лента» (размером пор 2–3 мкм), а также через стерильные мембранные фильтры (0,45 мкм) шприцевым методом. Для определения содержания гумусовых кислот (ФК и ГК) пробы отбирались также в 1,5 л емкости

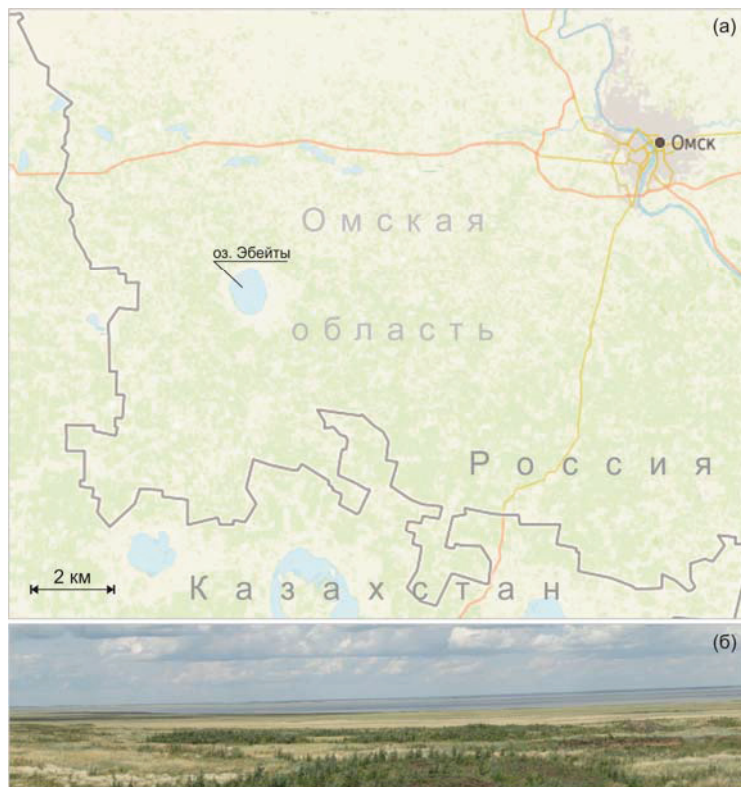


Рис. 1. Схема расположения озера Эбейты (а), фото долины озера Эбейты (б)

Fig. 1. Scheme of location of Ebeity Lake (a), photo of the valley of Ebeity Lake (b)

без подкисления. Для определения $C_{\text{орг}}$ пробы отбирались в стеклянные емкости объемом 100 мл и подкислялись азотной кислотой марки (осч). Все пробы хранились в холоде до доставки в химическую лабораторию.

Отбор керн донных отложений для седиментологического и рентгеноструктурного анализа проводился с использованием пластиковых труб диаметром 5 см. Донные отложения, необходимые для получения поровых вод, собирались в герметично упакованные емкости объемом 5 л и находились в неподвижном состоянии в течение нескольких часов для удаления свободной воды. После вскрытия емкостей верхний окислившийся слой удалялся, а лишняя вода сливалась. Отжатие поровых вод проводилось при давлении 100 бар; полученная жидкость собиралась в стерильные емкости и немедленно отправлялась в химическую лабораторию для последующего анализа.

Химико-аналитические измерения водных проб проводились по общепринятым методикам [8, 9] с использованием масс-спектральных методов, а также методов атомной абсорбции, пламенной-эмиссии, потенциометрии и титрования.

Минеральный состав образцов донных отложений определялся методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3 (излучение $\text{CuK}\alpha$). В ходе исследования также изучался химический состав твердых проб методом рентгено-флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения с регистрацией на Si (Li)-детекторе на станции элементного анализа ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, ошибка определения которого для отдельных элементов находится в пределах 5–15 %. С использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN проводилось детальное изучение отдельных образцов солевых отложений.

Программы и базы данных

В работе [10] были оцифрованы и повторно проанализированы с использованием модели NICA-Donnan данные из 171 реферативного источника, имеющие отношение к связыванию ионов металлов с фульво- и гуминовыми кислотами. Были получены общие значения параметров для моделирования при отсутствии экспериментальных измерений специфического связывания ионов с ФК и ГК. В программе MINTEQA2 [11] используются именно эти данные, поскольку они согласованы для 21 ионов металлов: Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr (III), Cu, Dy, Eu, Fe (II), Fe (III), Hg, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, Th, UO_2 , V (III), and Zn. Модель NICA-Donnan представляет собой комбинацию описания изотермы неидеальной конкурентной адсорбции (Non-Ideal Competitive Adsorption – NICA) связывания с гетерогенным материалом в сочетании с доннановской электростатической подмоделью, описывающей электростатические взаимодействия между ионами и гуминовыми веществами.

Окончательное выражение согласованной модели NICA для количества связанного вещества Q компонента i при концентрации раствора C_i выглядит следующим образом:

$$Q_i = \frac{n_{i1}}{n_{H1}} Q_{\text{max}1,H} \frac{(K_{i1}C_i)^{n_{i1}} [\sum_j (K_{i1}C_j)^{n_{i2}}]^{p_1}}{\sum_i (K_{i1}C_i)^{n_{i1}} + [\sum_i (K_{i1}C_i)^{n_{i2}}]^{p_1}} + \frac{n_{i2}}{n_{H2}} Q_{\text{max}2,H} \frac{(K_{i2}C_i)^{n_{i2}} [\sum_j (K_{i2}C_j)^{n_{i2}}]^{p_1}}{\sum_i (K_{i2}C_i)^{n_{i2}} + [\sum_i (K_{i2}C_i)^{n_{i2}}]^{p_1}}. \quad (1)$$

Подробная расшифровка смысла всех параметров приведена в процитированной работе [10]. Скажем только, что четыре параметра характеризуют гумусовое вещество (ГВ) – $Q_{\text{max}1,H}$ и $Q_{\text{max}2,H}$, описывая максимальную плотность позиций связывания ГВ (моль/кг⁻¹); где p_1 и p_2 представляют интервал распределения и включают внутреннюю неоднородность ГВ. В то же время еще четыре ион-специфических параметра K_{i1} , K_{i2} , n_{i1} , и n_{i2} используются для того, чтобы описать усредненное сродство и неидеальность связывания катионов в каждом распределении. Ниже приводится рисунок из [10], позволяющий предвидеть результаты модельных расчетов форм нахождения элементов в озере Эбейты при pH 5,7–6,2. В частности, очевидно, что уран, медь, окисное железо и торий будут вероятнее всего максимально связаны с фракцией ГВ.

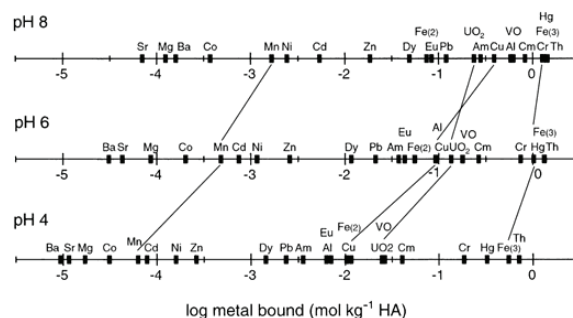


Рис. 2. Рассчитанное изменение связи широкого спектра ионов металлов с ГК (НА) при pH 4, 6 и 8. Расчет проведен при концентрации металла 10^{-9} М в присутствии 10^{-3} М Ca^{2+} . Диагональные линии для Mn, Cu, Fe (III), UO_2^{2+} позволяют судить о силе связи и ее зависимости от pH. Источник [10] с небольшими изменениями

Fig. 2. Calculated variation in metal-ion binding by generic HA for a wide range of metal ions and at pH 4, 6, and 8. Binding of each metal ion was calculated for 1 nM free metal ion with 1 mM free Ca^{2+} . The diagonal lines for Mn, Cu, Fe (III), UO_2^{2+} give an indication of the pH dependence of metal ion binding and implicitly of the molar H^+ /metal ion exchange ratio [10]

Расчеты равновесий в гетерофазной 20-компонентной системе H-O-C-S-Cl-Ca-Mg-Na-K-Fe-Mn-Al-Si-Sr-U-Cu-Br-Li-FA-НА проводились при 25 °C, общем давлении 1 атм с помощью пакета программ «HCh» (HydroChemistry), основанного на принципе минимизации термодинамического потенциала системы (энергии Гиббса), с использованием банка термодинамической информации

UNITHERM этого ПК [12]. Банк исходной информации был дополнен согласованными значениями свободных энергий образования минералов эвапоритов. Индексы насыщения рассолов по отношению к минералам (lgИН) рассчитывались как отношения произведений активности ионов к произведению растворимости минерала. Условие равновесия – это равенство lgИН $\pm 0,3$ ед. Коэффициенты активности рассчитывались для высокоминерализованных растворов по уравнению [13]:

$$\lg \gamma_i = -\frac{A \cdot z_i^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + B \cdot a_i \cdot \sqrt{I}} - \lg(1 + 0,018m^*) + \\ + [\omega_i b_{\text{NaCl}} + b_{\text{Na}^+ \text{Cl}^-} - 0,19(|z_i| - 1)] \cdot I, \quad (2)$$

где γ_i – моляльный коэффициент активности; m^* – сумма моляльных концентраций Σm_i ; ω_i – параметр Борна; b_{NaCl} – параметр сольватации, для NaCl равный 0,064. Первый терм уравнения (2) включает параметры Дебая–Хюккеля A , B , a , заряд частицы z , ионную силу I .

Граничным условием модели является существование соленых вод, находящихся в квазиравновесном состоянии (характеризуется бесконечно медленным переходом системы из одного состояния в другое) с донными отложениями двух озер. Их состав определен химическими анализами (табл. 1, 2). Далее рассматриваются некоторые возможные промежуточные термодинамические состояния, основным механизмом развития (смены) которых является процесс испарения воды, концентрирование химических элементов, осаждение вторичных минералов. Моделирование процесса испарения проводилось последовательным уменьшением объема H_2O в пробе в определенной последовательности: 1–0,5–0,1–0,05 кг.

Таблица 1. Рекомендованные для использования в программах минимизации свободной энергии Гиббса (типа HCh, СЕЛЕКТОР) константы реакций устойчивости катионов с ГК и ФК и сопутствующие параметры

Table 1. Stability constants of cations with HA and FK and accompanying parameters recommended for use in Gibbs free energy minimization software (such as HCh, SELECTOR)

Реакция/Formula	lg K	Реакция/Formula	lg K
$\text{FA1}^+ + \text{H}^+ = \text{FA1H}^0$	2,34	$\text{HA1}^+ + \text{H}^+ = \text{HA1H}^0$	2,93
$\text{FA2}^+ + \text{H}^+ = \text{FA2H}^0$	8,60	$\text{HA2}^+ + \text{H}^+ = \text{HA2H}^0$	8,00
$\text{FA1}^+ + \text{Cu}^{2+} = \text{FA1Cu}^+$	0,26	$\text{HA1}^+ + \text{Cu}^{2+} = \text{HA1Cu}^+$	2,23
$\text{FA1}^+ + \text{UO}_2^{2+} = \text{FA1UO}_2^+$	0,78	$\text{HA1}^+ + \text{UO}_2^{2+} = \text{HA1UO}_2^+$	2,45
$\text{FA1}^+ + \text{Fe}^{3+} = \text{FA1Fe}^{2+}$	6,00	$\text{HA1}^+ + \text{Fe}^{3+} = \text{HA1Fe}^{2+}$	3,50
$\text{FA1}^+ + \text{Ca}^{2+} = \text{FA1Ca}^+$	-2,13	$\text{HA1}^+ + \text{Ca}^{2+} = \text{HA1Ca}^+$	-1,37
$\text{FA2}^+ + \text{Cu}^{2+} = \text{FA2Cu}^+$	8,26	$\text{HA2}^+ + \text{Cu}^{2+} = \text{HA2Cu}^+$	6,85
$\text{FA2}^+ + \text{UO}_2^{2+} = \text{FA2UO}_2^+$	9,06	$\text{HA2}^+ + \text{UO}_2^{2+} = \text{HA2UO}_2^+$	4,81
$\text{FA2}^+ + \text{Fe}^{3+} = \text{FA2Fe}^{2+}$	36,0	$\text{HA2}^+ + \text{Fe}^{3+} = \text{HA2Fe}^{2+}$	17,5
$\text{FA2}^+ + \text{Ca}^{2+} = \text{FA2Ca}^+$	-3,0	$\text{HA1}^+ + \text{Cu}^{2+} = \text{HA1Cu}^+$	-0,43
Параметр Q_{max} , моль/кг		Параметр Q_{max} , моль/кг	
$Q_{\text{max}1}$	5,88	$Q_{\text{max}1}$	3,15
$Q_{\text{max}2}$	1,86	$Q_{\text{max}2}$	2,55

Для того чтобы встроить в БД UNITHERM набор данных для расчета сорбции катионов с ФК и ГК, были использованы также исходные данные из [10]. Сначала рассчитывались константы устойчивости, затем при допущении $\Delta G_{298, \text{FA}}^0$ и $\Delta G_{298, \text{HA}}^0 = 0$ рассчитывались свободные энергии закомплексованных с ФК и ГК ионов (Cu^{2+} , UO_2^{2+} , Fe^{3+}). Сравнение результатов расчетов с таковыми, полученными по специально предназначенной программе Minteq, при удовлетворительном совпадении позволяет рекомендовать значения констант для использования в дальнейшем (табл. 1). Как указано выше, в число независимых компонентов системы включены квази-элементы ФК и ГК, моделирующие конденсированное ядро соответствующих кислот и периферийные кислотные группы различных типов, главным образом карбоксильные и фенольные. Именно эти элементы структуры определяют общую кислотность и обеспечивают образование комплексных соединений ФК и ГК с основными ионами природных вод, тяжелыми металлами и актинидами. В [10] они обозначены как FA1 и FA2 и соответственно HA1 и HA2 (табл. 5–7).

Далее в «HCh» для расчета равновесий необходимо задать количество взаимодействующих ФК и ГК в моль/л или г/л, взаимопересчет единиц обеспечен имеющимися в базе данных атомными массами химических элементов. Однако, когда мы имеем дело с гуминовыми веществами, понятие молекулы исчезает и можно говорить только о молекулярном ансамбле [14]. Таким образом, если в воде озера Эбейты присутствует 11,45 мг/л ФК, то они обладают 0,067 моль/л позиций, способных связывать любые катионы, включая протон (5,88 моль/кг·11,45·10⁻³ кг/л).

Результаты и обсуждение

Химический состав воды озера

Макрокомпонентный состав вод

Гидрохимические характеристики оз. Эбейты представлены в табл. 2. По данным 1960-х гг. (когда наблюдался маловодный период), минерализация воды озера составляла 245,6 г/л, а ионный состав определялся Cl-Na [15]. В настоящее время, наоборот, идет многоводный период (Отчет..., 2007) и, как результат, минерализация озерной воды достигает 200 г/л, что значительно меньше полученных ранее данных. Значение pH озера в момент опробования составляло 5,7 и оставалось постоянным на всех глубинах озера (до 1 м). Для воды озера характерна восстановительная обстановка, значение Eh составляло -0,2 В. Состав воды $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$, с низкими концентрациями кальция, карбонат- и гидрокарбонат-ионов, не превышающими 0,5 экв. % (табл. 2). Содержание $C_{\text{орг}}$ озерной воды составляет около 110 мг/л, что значительно выше средних значений для озерных вод, представленных в [16]. Концентрации ФК и ГК достигли 11 и 2 мг/л, соответственно, что составляет лишь 12 % от $C_{\text{орг}}$.

Таблица 2. Химический состав озерных (до и после фильтрации через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм) и поровых вод (фильтрованных через 0,45 мкм), мг/л

Table 2. Chemical composition of lake water (before and passed through a 0,45- μ m pore size filter) and pore water (passed through a 0,45 μ m filter), mg/L

Компонент Component	Озерная вода Lake water		Поровые воды Pore water	Компонент Component	Озерная вода Lake water		Поровые воды Pore water
	До Before	После After			До Before	После After	
	фильтрации filtration				фильтрации filtration		
pH	5,7	–	6,2	Al	0,106	0,029	0,041
Eh, mV	–194	–	–305	As	0,095	0,102	0,046
TDS, g/L	206	196	261	Ag	0,007	0,002	5·10 ^{–5}
CO ₂	4	10	37	Ba	0,07	0,07	0,04
CO ₃ ^{2–}	18,3	3	3	Co	0,002	0,002	0,0003
HCO ₃ [–]	421	427	778	Cr	0,025	0,022	0,005
SO ₄ ^{2–}	77814	68608	80118	Cs	0,00009	0,0001	0,01
Cl [–]	56850	59500	89770	Cu	0,004	0,002	н.д.
Ca ²⁺	275	316	384	Fe	0,197	0,115	0,162
Mg ²⁺	3736	3978	7043	Li	0,388	0,443	0,736
Na ⁺	66850	63640	83044	Mo	0,024	0,023	0,117
K ⁺	141	142	253	Mn	0,053	0,050	0,097
Si	2,84	1,95	3,26	Ni	0,018	0,014	0,003
B	8,9	9,9	13,3	P	1,277	1,219	2,173
Br	131	127	193	Rb	0,017	0,017	0,033
TOC	113,8	н.д.	н.д.	Sc	0,0001	6·10 ^{–6}	0,0001
FA	11,45	н.д.	н.д.	Th	0,00004	0,00001	3·10 ^{–5}
HA	2,2	н.д.	н.д.	U	0,004	0,003	0,021

Примечание/Note: н.д. – нет данных/not available.

Поскольку озеро подвержено интенсивному испарению и рассолы его находятся в равновесном состоянии с сульфатными минералами (барит, тенардит и др.), преобладающим ионом в водах должен быть хлор-ион (равновесие относительно галита наступает лишь на более поздних стадиях испарения), однако молярное отношение Cl/SO₄ для озера составляет 1, что говорит о наличии дополнительных источников поступления сульфатов, которыми могут выступать талые снеговые воды HCO₃-SO₄-Cl Mg-Na-Ca состава [7], а также грунтовые воды SO₄-Cl Na состава (табл. 3).

Помимо изучения состава озерной воды нами были исследованы поровые воды донных отложений оз. Эбейты (табл. 2). Заметим, что отличие макрокомпонентного состава поровой воды от озерной заключается лишь в более высоких концентрациях хлорид-ионов, магния (разница может достигать 5 экв. %) и, как следствие, суммы общей минерализации. Ионный состав поровых вод Cl-Na; pH вод несколько выше озерных и достигает 6,2. Окислительно-восстановительная обстановка поровых вод также смещается в сторону восстановительной (Eh –0,3 В). Во время отбора проб от донных отложений интенсивно исходил запах сероводорода, а вдоль береговой линии были обнаружены хорошо сформированные органические маты.

Таблица 3. Химический состав грунтовых вод, питающих оз. Эбейты (пос. Красногорка), и атмосферных осадков [7], мг/л

Table 3. Chemical composition of supplying Ebeity Lake groundwater (Krasnogorka village) and precipitation [7], mg/L

Компонент Component	pH	Eh	CO ₂	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	K	TDS
Грунтовые воды Groundwater (2017)	8,9	89	14	629	778	550	30	49	838	2,3	2894
Снеговые воды Snow water (2006)	6,1	н.д.	н.д.	5,6	2,5	1,1	2	0,5	1,4	0,6	14

Примечание/Note: н.д. – нет данных/not available.

Микрокомпонентный состав вод

Для оз. Эбейты характерно накопление элементов, характеризующихся высокой миграционной способностью [17] и при этом длительное время сохраняющихся в растворе при интенсивном его испарении, не связываясь вторичными минералами (Li 400 мкг/л, Rb 17 мкг/л, В 9 мг/л). Детальный микрокомпонентный состав озерных и поровых вод представлен в табл. 2.

Сопоставление микрокомпонентного состава озерных вод до и после проведения фильтрации показывает уменьшение содержаний Al, Fe и Si. Это объясняется тем, что в процессе выветривания эти элементы образуют коллоиды, способные переноситься водой и, более того, удерживать в своем составе Cu, Cr, Ni, Th (табл. 2). Наоборот, более высокие концентрации после фильтрации обнаружены для As, B, Li. Для остальных микрокомпонентов значительных изменений не обнаружено.

В отличие от озерной воды, содержание большинства микрокомпонентов в поровых водах значительно выше. Так, например, содержание Li, Si, P, Mn, Rb и Th в поровых водах в 2 раза больше, U – в 6,5, Sc – в 20 и Cs – в 80 раз больше. Однако содержания Al, As, Ba, Co, Cr и Ni в поровых водах, наоборот, ниже значений, зафиксированных в поверхностной воде. Вполне возможно предположить пересыщение поровых вод по отношению к их собственным минералам или влияние изменившихся pH-Eh параметров среды на формы элементов нахождения в системе вода/порода.

Состав органических соединений в озерной воде и органических матах

В экстрактах, полученных из озерных вод и органических матов, идентифицированы ациклические и циклические углеводороды (УВ) и кислородсодержащие органические соединения (КОС), трифенилфосфаты и ароматические УВ, включающие полициклические (ПАУ) и линейные алкилбензолы (АБ). Содержание отдельных групп соединений приведено в табл. 4.

Таблица 4. Содержание органических соединений в озерной воде и органических матах оз. Эбейты, ppm

Table 4. Content of organic compounds in lake water and microbial mats of Ebeity Lake, ppm

Органические соединения Organic compounds	Вода Water	Маты Microbial mats	Органические соединения Organic compounds	Вода Water	Маты Microbial mats
Общая сумма углеводородов (УВ) и КОС* Total amount of hydrocarbons (HC) and OCOC*	84,6	2,7	Ациклические КОС/Acydic OCOC*	14,5	0,23
Ациклические УВ/Acydic hydrocarbons	58,4	2,3	Метиловые эфиры/Methyl ethers	0,3	0,07
Алканы/Alkane	13,8	2,26	Цетиловые эфиры/Cetyl esters	0,4	0,11
Алкены/Alkenes	44,5	н.д.	Изопропиловые эфиры Isopropyl ethers	0,07	0,03
Сквален/Squalene	0,19	0	Изопреноидный кетон Isoprenoid ketone	5,4	0,01
Нафтенческие УВ/Naphthenic hydrocarbons	следы	0,02	н-Алкан-2-оны/n-Alkan-2	0,37	0,01
Стераны/Sterane	следы	0,02	Фитолы/Phytols	7,91	н.д.
Ароматические УВ/Aromatic hydrocarbons	0,1	0,19	Циклические КОС/Cyclic OCOC	7,15	0,02
Линейные алкилбензолы (АБ) Linear alkylbenzenes	0	0,05	Токоферолы/Tocopherols	3,92	0,013
Полициклические алкилбензолы ПАУ Polycyclic alkylbenzenes	0,1	0,14	Дибензофураны/Dibenzofurans	0,01	0,002
Нафталины/Naphthalenes	0,08	0,05	Дитерпеноиды/Diterpenoids	0,002	0
Фенантроны/Phenanthrenes	0,02	0,07	Тритерпеноиды/Triterpenoids	0,05	0,002
Бифенилы/Biphenyls	0	0,02	Стероиды/Steroids	3,18	0,001
Трифенилфосфаты/Triphenyl phosphates	0,122	0	Тиофены/Thiophenes	4,232	н.д.

Примечание: н.д. – нет данных; жирным выделены основные компоненты органических соединений; КОС – кислородсодержащие органические соединения.

Note: н.д. – not available; main components of organic compound are marked in bold; OCOC – oxygen containing organic compounds.

Соотношение нефтяных изопреноидов к биологическим в оз. Эбейты составляет около 1,5, этому значению соответствует и сглаженный характер молекулярно-массового распределения н-алканов. Наряду с нефтяными компонентами в озерных водах присутствуют также ПАВ. Среди стероидов в озерной воде преобладают станолы – насыщенные структуры с кетонной группой, отсутствуют сквален и дитерпеноиды, токоферолы представлены только α -формой. Трифенилфосфатов озерные воды не содержат, а ПАУ, присутствующие в невысокой концентрации, представлены в основном нафталинами, фенантренами и бифенилами. Кроме того, в озере понижено содержание цетиловых эфиров. Вода озера загрязнена ПАВ и нефтепродуктами.

В исследованных органических матах, расположенных вдоль береговой линии озера, среди органических соединений доминируют ациклические УВ, повышено содержание фитола, стероидов. Содержание стероидов существенно превышает содержание тритерпеноидов. В индивидуальном составе стероидов доминируют ненасыщенные соединения преимущественно со спиртовыми группами, а среди них – холестерол. Среди токоферолов преобладает α -токоферол. Стероиды органических матов на 95,5 % представлены производными холестерана. ПАУ органических матов представлены фенантренами и нафталинами с преобладанием последних. В составе ациклических кетонов доминирует изопреноидный кетон. В составе н-алкан-2-онов в максимальной концентрации содержится гомолог C_{27} . Среди ациклических УВ резко преобладают алкены, представленные мононенасыщенным C_{17} алкеном.

Table 5. Массовое распределение органических и неорганических форм миграции компонентов раствора оз. Эбейты (по К.В. Девис [19])

Table 5. Mass distribution of dissolved inorganic and organic phases of components (using K.W. Davis approach [19])

Компонент Component	Растворенная неорганическая форма Dissolved inorganic		Связано с растворенным органическим веществом Bound to dissolved organic matter		Общее количество элемента в растворенном состоянии Total dissolved
	mol/L	%	mol/L	%	
Ca ⁺²	1,37·10 ⁻⁰³	100	1,45·10 ⁻⁰⁷	0,01	1,37·10 ⁻⁰³
Cu ⁺²	5,15·10 ⁻⁰⁹	10	4,67·10 ⁻⁰⁸	90,0	5,18·10 ⁻⁰⁸
Fe ⁺³	1,78·10 ⁻¹⁷	0	2,21·10 ⁻⁰⁶	100	2,21·10 ⁻⁰⁶
K ⁺¹	1,48·10 ⁻⁰³	100	5,85·10 ⁻⁰⁸	0,004	1,48·10 ⁻⁰³
Li ⁺¹	2,48·10 ⁻⁰⁵	100	1,21·10 ⁻⁰⁹	0,005	2,48·10 ⁻⁰⁵
Mg ⁺²	3,08·10 ⁻⁰²	100	4,20·10 ⁻⁰⁶	0,01	3,08·10 ⁻⁰²
Mn ⁺²	1,88·10 ⁻⁰⁷	99	1,68·10 ⁻⁰⁹	0,89	1,89·10 ⁻⁰⁷
Na ⁺	1,24	100	5,64·10 ⁻⁰⁵	0,005	1,24
NH ₄ ⁺	4,52·10 ⁻⁰⁶	100	1,49·10 ⁻¹⁰	0,003	4,52·10 ⁻⁰⁶
Ni ⁺²	5,77·10 ⁻⁰⁸	98	1,23·10 ⁻⁰⁹	2,0	5,90·10 ⁻⁰⁸
Th ⁺⁴	0	0	4,79·10 ⁻¹¹	100	4,79·10 ⁻¹¹
UO ₂ ⁺²	2,24·10 ⁻¹⁰	1,2	1,88·10 ⁻⁰⁸	98,8	1,90·10 ⁻⁰⁸

Физико-химическое моделирование процессов комплексообразования в присутствии высокомолекулярных органических соединений и взаимодействия в системе «вода-порода»

С использованием указанного ПК Visual MINTEQ 3.1 для водного раствора оз. Эбейты были рассчитаны миграционные формы элементов. По расчетным данным, Na, K, Li, Mn в озерных водах мигрируют преимущественно в ионной форме. Для Ca и Mg ха-

рактрно также частичное связывание их в комплексы с карбонат-, сульфат- и хлорид-ионами в прямой зависимости от роста минерализации вод [18].

Формы миграции Fe, Cu, Ni, Mn, Th и U определяются в первую очередь содержанием органического вещества (табл. 2); большую роль на миграционные способности этих элементов оказывают фульвовые и гуминовые кислоты (табл. 3). Так, торий и железо полностью связаны с органическим веществом (до 100 %), около 90–99 % меди и урана также связано с растворенной органикой, и, наконец, небольшая доля марганца и никеля (1–2 %).

Таблица 6. Процентное распределение растворенных органических и неорганических форм миграции некоторых элементов*

Table 6. Percentage distribution among dissolved inorganic and organic species of some elements*

Форма миграции компонента Species name of component	% от общей концентрации элемента % of total concentration	Форма миграции компонента Species name of component	% от общей концентрации элемента % of total concentration
Cu ⁺²	0,03	Ni ⁺²	0,33
CuCl ⁺	0,39	NiCl ⁺	0,86
CuCl ₂ (aq)	0,09	NiCl ₂ (aq)	0,02
CuSO ₄ (aq)	9,43	NiSO ₄ (aq)	96,49
FA1-Cu (aq)	50,06	Ni(SO ₄) ₂ ⁻²	0,20
FA2-Cu (aq)	11,45	NiHCO ₃ ⁻	0,02
HA1-Cu (aq)	13,94	HA2-Ni (aq)	0,04
HA2-Cu (aq)	14,60	FA1-Ni (aq)	1,30
Mn ⁺²	0,35	FA2-Ni (aq)	0,04
MnCl ₃ ⁻	1,39	HA1-Ni (aq)	0,71
MnCl ₂ (aq)	3,50	HA2-UO ₂ (aq)	1,52
MnCl ⁺	2,45	UO ₂ SO ₄ (aq)	0,70
MnSO ₄ (aq)	91,42	UO ₂ (SO ₄) ₂ ⁻²	0,43
HA2-Mn (aq)	0,03	UO ₂ HPO ₄ (aq)	0,01
FA1-Mn (aq)	0,69	UO ₂ CO ₃ (aq)	0,02
HA1-Mn (aq)	0,16	FA1-UO ₂ (aq)	74,78
FA1-Fe(III) (aq)	1,46	FA2-UO ₂ (aq)	9,67
FA2-Fe(III) (aq)	98,41	HA1-UO ₂ (aq)	12,86
HA2-Fe(III) (aq)	0,13	HA2-Th (aq)	0,64
		FA1-Th (aq)	0,08
		FA2-Th (aq)	99,27

*FA1-Me (aq), FA2-Me (aq) – формы миграции металлов, органически связанные с фульвовыми кислотами. Символы 1 и 2 соответствуют карбоксильным COOH (как с фенольным (циклическим), так и с алифатическим (ациклическим) типами соединения) и фенольным OH функциональным группам.

*FA1-Me (aq), FA2-Me (aq) are the organically complexed Me²⁺ to dissolved fulvic acid. Sites 1 and 2 refer to carboxylic COOH (both of phenolic (C-ring) and aliphatic (C-chain) characters) and phenolic (OH) functional groups.

Детальное изучение распределения форм миграции элементов с высокомолекулярным органическим веществом (табл. 6) показало, что большая часть меди связана в хелаты с карбоксильными функциональными группами фульвовых кислот (50 %) и лишь небольшая доля с фенольными (около 10 %). Кроме того, согласно расчетам физико-хи-

мического моделирования, около 30 % меди связывается в комплексы с гуминовыми кислотами. Более 90 % железа и тория мигрируют в составе хелатов с фенольными группами, и около 70 % урана – с карбоксильными группами фульвовых кислот.

Таблица 7. Процентное распределение форм миграции металлов с ФК и ГК при pH 5,7, содержания металлов и кислот из табл. 2

Table 7. Percentage distribution of metal species with HA and FA at pH=5,7, the content of metals and acids is from Table 2

Компонент Component	% от общей концентрации % of total concentration	Форма миграции Species name	Компонент Component	% от общей концентрации % of total concentration	Форма миграции Species name
FA1-(aq)	81,22	HFA1- (aq)	HA1-(aq)	73,24	HFA1- (aq)
	15,01	FA1-H (aq)		11,44	HA1-H (aq)
	0,14	FA1-Ca (aq)		0,28	HA1-Ca (aq)
	0,04	FA1-Cu (aq)		0,11	HA1-Cu (aq)
	0,04	FA1-Fe(III) (aq)		14,86	HA1-Mg (aq)
	3,51	FA1-Mg (aq)		0,04	HA1-UO ₂ (aq)
FA2-(aq)	0,02	FA1-UO ₂ (aq)	HA2-(aq)	11,85	HFA2- (aq)
	41,98	HFA2- (aq)		87,60	HA2-H (aq)
	49,38	FA2-H (aq)		0,35	HA2-Mg (aq)
	0,02	FA2-Cu (aq)		0,13	HA2-Cu (aq)
	8,60	FA2-Fe(III) (aq)		0,05	HA2-Fe(III) (aq)

Как видно из табл. 7, фульвовые и гуминовые кислоты могут находиться в ассоциированном (FA-H или HA-H) или диссоциированном виде (HFA1- или HFA2-) состоянии, при этом соотношение этих форм связано с кислотно-щелочными условиями среды через константы (табл. 1). В модели принято, что процессы комплексообразования с металлами происходят при участии диссоциированной формы гуминовых кислот. Поэтому важно показать, что при pH 5,7 на диссоциированные (активные) формы приходится 73–81 % карбоксильных групп ФК и ГК и всего лишь 12–42 % фенольных групп ФК и ГК соответственно. Можно сделать вывод, что в комплексообразовании принимают участие в основном карбоксильные группы ФК (HFA1-). Однако больше всего, например, Fe (III) связано с фенольными группами, потому что константы комплексообразования с ними сильнее на 6 порядков (табл. 2). Из этого примера становится ясным роль моделирования (уравнение 1), позволяющего учесть многие нюансы. Другой пример связан с Mg, который, имея константы ассоциации меньше, чем кальций, занимает от 3,5 до 15 % сорбционных позиций ФК. Это уже связано с тем, что его концентрация в растворе 3736 мг/л, а кальция – 275 мг/л.

Термодинамические расчеты равновесия вода/порода (табл. 8) показали, что воды озера Эбейты при pH ~6 и Eh ~0 мВ (с поправкой на стандарт-

ный потенциал водородного электрода) минимально пересыщены по отношению к кварцу, Cr_2O_3 , гетиту, хлориту, апатиту, присутствует $\text{Cu}_{(\text{мет})}$. Логарифмы Индексов Насыщения (lgИН) минералов солей $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (мирабилит) и $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ (глауберит) равны соответственно $-0,365$ и $-0,037$. Можно сказать, что вода уже находится с этими минералами в равновесии.

Тот факт, что в расчетных твердых фазах получается почти 84 % апатита, демонстрирует еще раз аномально высокое присутствие биогенного фосфора в свободной и поровой воде озера Эбейты (1,277 и 2,173 мг/л соответственно при ПДК для рыбохозяйственных водоемов 0,2 мг/л). Известно, что апатит по сравнению с алюмосиликатными минералами более устойчив, особенно в присутствии уголекислоты. Однако при наличии гуминовых кислот он легко растворяется. Возможно это является причиной, препятствующей осаждению апатита. В условиях равнинной территории, где расположено озеро Эбейты, зависимость состояния водоемов от последствий хозяйственного освоения водосборов проявляется особенно четко, и, по мнению [5], антропогенное влияние на озеро вызвано в первую очередь строительством дамб на балках, созданием копаней для животных и образованием траншеи после изъятия труб водопровода без проведения рекультивационных работ. Сейчас идет антропогенная эвтрофикация – ускоренный процесс старения озера из-за попадания в водоем стоков, содержащих биогенные элементы (фосфор, азот).

Поверхностные воды недосыщены по отношению к полевым шпатам, плагиоклазу и кальциту, зафиксированным РСА. Поскольку pH вод в летний период (период опробования озера) составлял 5,7, можно предположить, что в описываемый «момент времени» происходит растворение терригенного обломочного материала.

При моделировании процесса испарения солевых вод оказалось, что при уменьшении количества воды в два раза (0,5 кг) главной фазой ассоциации является мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ с микропримесью глауберита $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ (0,35 %). Заметим, что корневой пласт солей в центральной части озера является мирабилитовым [3]. На этом шаге, как и на всех последующих, вода находится в равновесии с таким минералом, как югстерит $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а lgИН Na_2SO_4 равен $-0,293$. При дальнейшем испарении появляется все больше тенардита (до 53,69 %), галита (до 42,39 %), присутствуют следы высокомагнезиального кальцита, мирабилита, вода близкоравновесна с астраханитом $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (lg ИН $-0,399$). В то же время в работе [3] при исследовании процессов образования и накопления минеральных солей озера Эбейты был проведен анализ образцов на порошковом дифрактометре D2 Phazer (Bruk 10r, ФРГ). Он показал содержание мирабилита 57,83 % и тенардита 42,17 %, а накопление NaCl и Br происходит преимущественно в растворе. Но и при моделировании, вплоть до некоторого шага (испарении

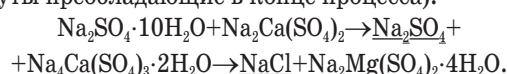
Таблица 8. Результаты моделирования испарения рассолов озера Эбейты (% минеральной фазы). Отрицательные величины – это lgИН минералов в близком равновесии с водой озера

Table 8. Results of evaporation modeling of the brines of Lake Ebeity. Negative values are the lg min of minerals in close equilibrium with lake water

Минерал/Mineral	Моль/Mol	%	Моль/Mol	%	Моль/Mol	%	Моль/Mol	%
Количество воды, кг Water amount, kg	1		0,5		0,1		0,05	
$\text{Cu}_{(\text{мет})}/\text{Cu}_{(\text{мет})}$	$6,2 \cdot 10^{-08}$	0,05	$6,3 \cdot 10^{-08}$		$6,4 \cdot 10^{-08}$		$6,4 \cdot 10^{-08}$	
Кварц/Quartz	$5,4 \cdot 10^{-06}$	3,92	$6,3 \cdot 10^{-05}$		$9,4 \cdot 10^{-05}$		$9,4 \cdot 10^{-05}$	
Гетит/Goethite FeOOH	$2,6 \cdot 10^{-06}$	2,82	$2,8 \cdot 10^{-06}$	–	$2,7 \cdot 10^{-06}$	–	$2,7 \cdot 10^{-06}$	–
Апатит-ОН/Apatite-ОН	$1,4 \cdot 10^{-05}$	83,86	$1,4 \cdot 10^{-05}$		$1,4 \cdot 10^{-05}$		$1,4 \cdot 10^{-05}$	
Хлорит/Chlorite	$1,3 \cdot 10^{-06}$	8,9	$1,3 \cdot 10^{-06}$		$1,3 \cdot 10^{-06}$		$1,3 \cdot 10^{-06}$	
Cr_2O_3	$2,4 \cdot 10^{-07}$	0,45	$2,4 \cdot 10^{-07}$		$2,4 \cdot 10^{-07}$		$2,4 \cdot 10^{-07}$	
Глауберит/Glauberite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	$-0,37$		$2,2 \cdot 10^{-03}$	0,4	$6,4 \cdot 10^{-03}$	0,8	$6,4 \cdot 10^{-03}$	1,0
Мирабилит/Mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$-0,04$		$5,4 \cdot 10^{-01}$	99,6	$2,9 \cdot 10^{-01}$	41,0	$1,6 \cdot 10^{-02}$	2,9
Тенардит/Thenardite Na_2SO_4	$-0,61$		$-0,29$		$4,1 \cdot 10^{-01}$	25,0	$6,8 \cdot 10^{-01}$	53,7
Mg-кальцит/Mg-calcite $\text{Ca}_{52}\text{Mg}_{48}\text{CO}_3$	$-0,97$				$4,3 \cdot 10^{-04}$	0,0	$4,3 \cdot 10^{-04}$	
Галит/Halite NaCl	$-1,22$	$-0,46$	$-0,50$	1,3	33,2	1,3	42,4	
Сульфат натрия и кальция/Eugsterite $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$-0,91$				–		–	–
Астраханит/Bloedite $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$-2,06$	$-0,28$	$-1,63$	–	$-0,4$	–	$-0,4$	
Гипс/Gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$-0,47$		$-0,48$		$-0,8$		$-0,8$	

0,9 кг воды) накопление этих элементов происходило в растворе, а потом выпадал NaCl (осаждение NaBr или KBr не достигалось в силу технической невозможности расчетов при таких высоких ионных силах). Если молярные отношения Na/Ca/Mg в исходном растворе были 2,9/0,007/0,154, то в конечном 0,184/0,0002/0,154 соответственно.

Таким образом, при испарении рассолов озера Эбейты выделение солей из растворов начинается не с карбонатов Ca, Mg или сульфатов кальция, как диктует обычный порядок, а непосредственно с сульфатов Na с возможной примесью сульфатов Na и Ca, которые по мере развития процесса сопровождается галит NaCl. Если в целом проследить постепенное, по мере пересыхания растворов, добавление минералов эвапоритов, то оно будет таким (включая те, которые близки к насыщению, при этом подчеркнуты преобладающие в конце процесса):



Методом рентгеноструктурного анализа в составе твердых фаз донного осадка обнаружен кварц как основная фаза, примесь NaCl, малые примеси кпш, плагиоклаза и кальцита. Солевые выцветы вдоль озера и на глубине представлены тенардитом, небольшим-средним количеством галита и следами астраханита.

Если обратиться к данным седиментологического анализа (рис. 3), то становится очевидным, что вплоть до глубины 21 см преобладает песок, что говорит о высокой степени сноса терригенного материала с берегов (засушливые условия). Ниже в двух слоях (27 и 32,5 см) вообще отсутствует песчаная фракция, что свидетельствует о преимущественно водном режиме накопления осадков. Эти илисто-глинистые с карбонатами и органикой осадки содержат более 30 % солей, предохраняя их от растворения. К таким илам, насыщенным солью, применяется термин сазыз [3]. Ниже опять чередуются песчаный (37,5 см) и глинисто-солевой горизонты. В целом настораживает слишком мощный верхний слой с песчаным материалом, предполагающий либо техногенное перемещение

земель на изучаемой территории, либо значительный период засухливости. По данным [5], действительно, за последнее десятилетие наблюдается значительное снижение уровня озера и роль подземного стока в это время более значима, чем в многоводные сезоны. Данные, полученные методом ААС, свидетельствуют, что в осадках в десятых долях % обнаружены Mn, Ba, Sr, но в целом рассеянные элементы находятся на уровне регионального фона (табл. 9).

Табл. 9. Содержания компонентов в донных осадках озера Эбейты (ААС)

Table 9. Content of components in the bottom sediments of Ebeity Lake (AAS)

Элемент Component	Fe	Al	Ca	Mg	K	Na	Si							
%	1,42	1,59	1,23	1,0	0,55	2,31	1,77							
Элемент Component	Cr	V	Li	Cd	Mn	Ba	Sr	Zn	Cu	Sb	Pb	Co	Ni	
мг/л/ppm	18	<15	7,6	0,02	235	243	120	25	14	0,85	8,9	3,5	21	

Дополнительно проанализированы солевые выцветы, образующиеся при усыхании богатого Na и Mg рассола. Данные, полученные с помощью сканирующего микроскопа, позволяют судить о составе минералов, которые кристаллизуются из растворов при испарении. Например, на рис. 4 показан внешний вид и данные EDS в каждой из четырех точек. Расшифровка составов дана в подписочной подписи и в табл. 10.

Табл. 10. Полуколичественный химический состав точек 1–4 состава минеральных агрегатов в озере Эбейты, рис. 4

Table 10. Semi-quantitative chemical composition of samples 1–4 of mineral aggregates in Ebeity Lake, Fig. 4

№ точки № of sample	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	FeO	Всего Total
1	61,67	0	0	0	58,28	0	0	0	0	119,95
2	59,73	0	0	0	61,31	0	0	0	0	121,03
3	33,73	9,4	1,8	2,78	48,87	1,27	1,65	5,02	0,49	105,01
4	68,52	3,08	1,87	0,28	10,99	52,71	0,49	0	0	138,5

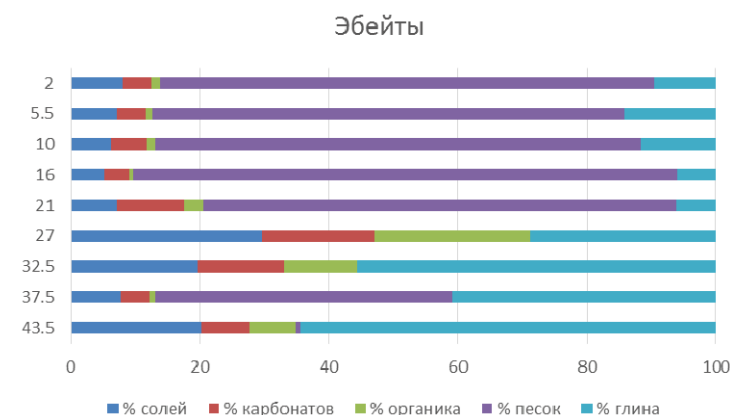


Рис. 3. Седиментационный анализ донных отложений оз. Эбейты

Fig. 3. Sedimentation analysis of bottom sediments of Ebeity Lake

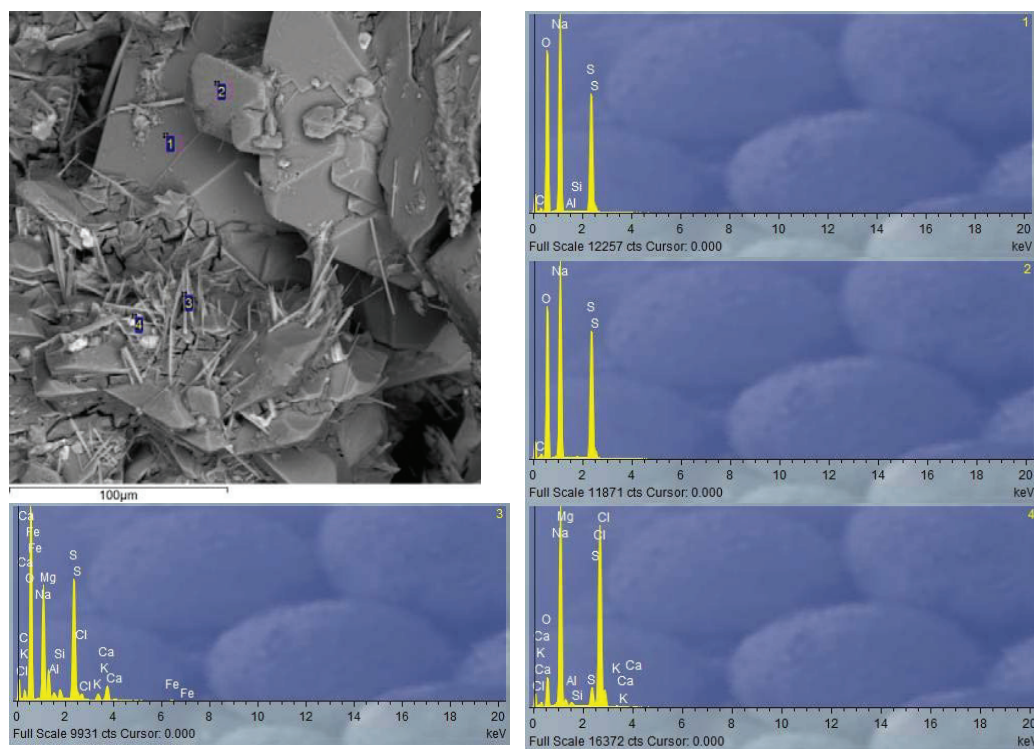


Рис. 4. Внешний вид и составы минеральных агрегатов в озере Эбейты. Точки 1, 2 – сульфаты натрия с примесью хлорида Na; 3 – сложная смесь сульфатов натрия (игольчатые), NaCl, гидроксидов Fe (III), карбонатов Ca-Mg и плагиоклазов; 4 – смесь с преобладанием хлорида натрия (до 60 %), карбонатов и кпш. Полуколичественный химический состав точек 1–4 в табл. 10

Fig. 4. Appearance and compositions of mineral aggregates in Ebeity Lake. Samples 1, 2 are the sulfates of sodium with a mixture of Na chloride; 3 is the complex mixture of sodium sulfates (needle), NaCl, Fe (III) hydroxides, Ca-Mg carbonates and plagioclases; 4 is the mixture with predominance of sodium chloride (up to 60 %), carbonates and potassium feldspars. The semi-quantitative chemical composition of samples 1–4 is in Table 10

Выводы

В ходе исследования химического состава воды оз. Эбейты выявлено, что озеро относится к $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ типу с высоким Mg/Ca отношением (около 13), при этом основное питание озера поступает с тальми снеговыми и грунтовыми водами такого же состава. Судя по характеристике окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий среды, опробование озера в июле 2015 г. происходило в период активного роста и размножения биомассы и привноса органического вещества, о чем свидетельствует восстановительная обстановка среды и наличие хорошо сформированных органических матов вдоль береговой линии озера. Общее количество растворенного органического вещества 113 мг/л, отмечено аномально высокое присутствие биогенного фосфора в свободной и поровой воде (1,277 и 2,173 мг/л соответственно), выявлено заражение ПАВ и нефтепродуктами, происходит эвтрофикация озера.

В мольном соотношении макрокомпонентный состав отобранных в ходе исследования поровых вод не сильно отличается от состава озерной воды, что говорит о достаточно интенсивном взаимодействии системы вода – донные отложения при низких их отношениях. Концентрации некоторых микроэлементов в поровых водах могут значительно

превышать озерные концентрации. Так, содержания Al, Fe, Li, Mn, P больше в 1,5–2 раза, Mo – в 5, U – в 7. Такое возможно лишь при смене геохимических параметров среды и, как следствие, в изменении миграционных способностей элементов-комплексобразователей.

Изучение минерального состава донных отложений подтверждает результаты термодинамического моделирования. Превалирующей фазой в солевых выцветах является тенардит, с примесями галита и астраханита, что соответствует результатам, полученным в ходе моделирования. Важно отметить, что образование устойчивых комплексных соединений элементов, в том числе с органическим веществом, играет немалую роль при проведении термодинамических расчетов [18] и не может оставаться без внимания при изучении процессов взаимодействия вода–порода [20, 21]. Согласно последним исследованиям [22], органическое вещество, присутствующее в соленых озерах, может в корне изменить геохимические процессы преобразования вещества.

Аналитическая часть работы выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-17-10003). Авторы выражают благодарность за поддержку по госзаданиям VIII.72.1. № 0330-2016-0001 (ГОЛ, НОС, КМН) и IX.127 № 0330-2016-0018 (КСК) при организации экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Объяснительная записка и материалы к разведке и подсчету запасов сульфата натрия на озере Эбейты / С.И. Синихин, М.Р. Махензон, И.С. Спиро и др. – Л.: Новосибирск, 1952. – 229 с.
2. Кузьмин А.И. Подземный сток озера Эбейты // Известия Омского отдела Географического общества СССР. – 1968. – Вып. 9. – С. 69–76.
3. Трапезников Д.Е., Исаева Г.А. Минеральные соли озера Эбейты // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2014. – № 17. – С. 176–180.
4. Трапезников Д.Е. Особенности соленакопления озера Эбейты в Омской области // Металлогения древних и современных океанов. – 2014. – № 20. – С. 221–224.
5. Тусупбеков Ж.А., Ряполова Н.Л., Надточий В.С. Гидролого-климатические и эколого-географические условия формирования элементов водного баланса озера Эбейты Омской области // Природобустройство. – 2014. – № 4. – С. 60–63.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 351 с.
7. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Омской области в 2006 году. – Омск: ЗАО «Манифест», 2007. – 288 с.
8. Новиков Ю.В., Ласточкина К.О., Болдина З.Н. Методы исследования качества воды водоемов. – М.: Медицина, 1990. – 400 с.
9. Фомин Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Протектор, 1995. – 624 с.
10. Generic NICA-Donnan Model Parameters for Metal-Ion Binding by Humic Substances / Ch.J. Milne, D.G. Kinniburgh, W.H. Rijndijk, E. Tipping // Environ. Sci. Technol. – 2003. – V. 37 (5). – P. 958–971.
11. Felmy A.R., Girvin D.C., Jenne E.A. MINTEQA – a computer program for calculating aqueous geochemical equilibria. EPA-600/3-84-031. – Athens, GA.: U.S. Environmental Protection Agency, 1984. – 98 p.
12. Шваров Ю.В. HCh: Новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия. – 2008. – № 8. – С. 898–903.
13. Helgeson H.C., Kirkham D.H., Flowers G.C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients, and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600 °C and 5 kb // American Journal of Science. – 1981. – V. 281 (10). – P. 1249–1516.
14. Перминова И.В. Гуминовые вещества – вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. – 2008. – № 1. – С. 50–55.
15. Гидрогеология СССР. Т. XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская область, Омская область, Новосибирская область, Томская область). – М.: Недра, 1970. – 368 с.
16. Global Landscape of Total Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Lake Water / Ming Chen, Guangming Zeng, Jiachao Zhang, Piao Xu, Anwei Chen, Lunhui Lu // Scientific Reports. – 2015. – V. 5. – Article number 15043.
17. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швецов В.М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. 2-е издание, дополненное. – М.: Наука, 2012. – 672 с.
18. Колпакова М.Н., Гаськова О.Л. Физико-химическое моделирование вариаций химического состава соленых вод в процессе их испарения (на примере озер Западной Монголии) // Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. – Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2015. – С. 146–150.
19. Davies C.W. The extent of dissociation of salts in water. P. VIII. An equation for the mean ionic activity coefficient of an electrolyte in water, and a revision of the dissociation constants of some sulphates // Journal of the Chemical Society. – 1938. – P. 2093–2098.
20. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
21. Термодинамическая модель поведения урана и мышьяка в минерализованном озере Шаагай-нуур (северо-западная Монголия) / О.Л. Гаськова, В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, С.Л. Шварцев М.Н. Колпакова // ДАН. – 2015. – Т. 465. – № 2. – С. 203–207.
22. Sorokin D.Y., Banciu H.L., Muyzer G. Functional microbiology of soda lakes // Current Opinion in Microbiology. – 2015. – V. 25. – P. 88–96.

Поступила 21.09.2017 г.

Информация об авторах

Колпакова М.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гаськова О.Л., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; профессор Национального исследовательского Новосибирского государственного университета.

Наймушина О.С., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Кривоногов С.К., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.41, 550.42, 550.461

EBEITY LAKE, RUSSIA: CHEMICAL-ORGANIC AND MINERAL COMPOSITION OF WATER AND BOTTOM SEDIMENTS

Marina N. Kolpakova^{1,2},
Marina.kolpakova@gmail.com

Olga L. Gaskova^{1,3},
gaskova@igm.nsc.ru

Olga S. Naymushina¹,
olgnaim@mail.ru

Sergey K. Krivonogov¹,
s_krivonogov@mail.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Russian Academy of Sciences,
3, Academic Koptiyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Novosibirsk State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study and monitor the ecological and geochemical status of a complex mineral salt deposit of Ebeity Lake. The total industrial reserves of sodium sulfate (mirabilite) in the lake water are 36,89 million tons. In addition, this lake is of interest as a deposit of therapeutic mud, as well as the crustaceans *Artemia Salina* L. and their cysts.

The aim of the study is to determine the main features of macro-, micro-component, organic and mineral composition of the lake Ebeity, as well as to determine the hydrogeochemical processes affecting the distribution of organomineral complexes of elements.

Research methods. The lake was studied in summer 2015. The lake and porous waters, as well as bottom sediments were analysed using mass spectral methods, as well as the methods of atomic absorption, flame emission, potentiometry, titration, etc. The study of bottom sediments was also carried out using the X-ray powder diffractometry method with mandatory control of the composition of typical solid samples by X-ray fluorescent analysis using synchrotron radiation with registration on a Si (Li) detector.

The results of the studies showed that Ebeity Lake refers to the $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ composition, the pH of the lake during the sampling period was 5,7, the lake was characterised by anoxic condition. The pore waters of bottom sediments do not differ from the lake water in their major composition, but the concentrations of trace elements are 2–8 times higher than the values in the lake. The study of complexation of elements in lake water shown that most of iron, copper, uranium and thorium is bound to a high molecular organic matter that allows presuming the impossibility of formation of such minerals as goethite, chlorite and Cu (met), obtained during thermodynamic calculations. The results obtained at simulation allowed us to construct a sequence of formation of evaporite minerals in the lake: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaCl} + \text{Na}_4\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. A study of the mineral composition of bottom sediments showed the presence in solid phase of quartz as the main phase, impurities of NaCl, small admixtures of potassium feldspars, plagioclase, and calcite. The salt along the lake and at the bottom is represented by thenardite, a small-medium amount of halite and traces of astrakhanite.

Key words:

Saline lakes, Ebeity, chemical composition, bottom sediments, Humid acids, HCh, MINTEQ.

The analytical part of the study was financially supported by the RSF (Russian Science Foundation, Project 15-17-10003). The authors acknowledge the support on government tasks VIII.72.1. № 0330-2016-0001 (GO, NO, KM), IX.127 № 0330-2016-0018 (KS).

REFERENCES

1. Sinihin S.I., Makhenzon M.R., Spiro I.S. *Obyasnitelnaya zapiska i materialy k razvedke i podschetu zapasov sulfata natriya na ozere Ebeity* [Explanatory note and materials for exploration and estimation of sodium sulfate reserves at Ebeity Lake]. Leningrad: Novosibirsk, 1952. 229 p.
2. Kuzmin A.I. Podzemny stok ozera Ebeity [Underground drainage of Lake Ebeity]. *Izvestiya Omskogo otdela Geograficheskogo obshchestva SSSR* [Izvestia of the Omsk Division of the Geographical Society of the USSR], 1968, vol. 9, pp. 69–76.
3. Trapeznikov D.E., Isaeva G.A. Mineral salts of Lake Ebeity. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo*, 2014, vol. 17, pp. 176–180. In Rus.
4. Trapeznikov D.E. Osobennosti solenakopleniya ozera Ebeity v Omskoy oblasti [Features of salt accumulation of Lake Ebeity in Omsk region]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2014, vol. 20, pp. 221–224.
5. Tusupbekov Zh.A., Ryapolova N.L., Nadtoshn V.S. Hydrologic-climatic and ecogeographical conditions for formation of elements of water balance of Lake Ebeity, Omsk Region. *Prirodooobustrojstvo*, 2014, vol. 4, pp. 60–63. In Rus.
6. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vypusk 2. Srednyaya Ob* [Resources of surface waters of the USSR. V. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 351 p.
7. *Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Omskoy oblasti v 2006 godu* [Report on the state and protection of the en-

- vironment of Omsk region in 2006]. Omsk, Manifest Publ., 2007. 288 p.
8. Novikov Yu.V., Lastochkina K.O., Boldina Z.N. *Metody issledovaniya kachestva vody vodoemov* [Methods for studying water quality in reservoirs]. Moscow, Meditsina Publ., 1990. 400 p.
 9. Fomin G.S. *Voda. Kontrol khimicheskoy, bakterialnoy i radiatsionnoy bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam. Entsiklopedichesky spravochnik* [Water. Control of chemical, bacterial and radiation safety according to international standards. Encyclopedic reference book]. Moscow, Protektor Publ., 1995. 624 p.
 10. Milne Ch.J., Kinniburgh D.G., Riemsdijk W.H., Tipping E. Generic NICA –Donnan Model Parameters for Metal-Ion Binding by Humic Substances. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 958–971.
 11. Felmy A.R., Girvin D.C., Jenne E.A. *MINTEQA – a computer program for calculating aqueous geochemical equilibria*. EPA-600/3–84–031. Athens, GA., U.S. Environmental Protection Agency, 1984. 98 p.
 12. Shvarov Yu.V. HCh: new opportunities of thermodynamic modeling of geochemical systems, supported by Windows. *Geochemistry international*, 2008, no. 8, pp. 898–903. In Rus.
 13. Helgeson H.C., Kirkham D.H., Flowers G.C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients, and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600 °C and 5 kb. *American Journal of Science*, 1981, vol. 281, no. 10, pp. 1249–1516.
 14. Perminova I.V. Guminovye veshchestva – vyzov khimikam XXI veka [Humic substances is a challenge to chemists of the XXI century]. *Himiya i zhizn*, 2008, vol. 1, pp. 50–55.
 15. *Gidrogeologiya SSSR. Tom XVI. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya oblast, Omskaya oblast, Novosibirskaya oblast, Tomskaya oblast)* [Hydrogeology of the USSR. T. XVI. West Siberian Plain (Tyumen Region, Omsk Region, Novosibirsk Region, Tomsk Region)]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
 16. Ming Chen, Guangming Zeng, Jiachao Zhang, Piao Xu, Anwei Chen, Lunhui Lu. Global Landscape of Total Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Lake Water. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, Article number 15043.
 17. 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, Nauka Publ., 2012. 672 p.
 18. Kolpakova M.N., Gaskova O.L. Fiziko-khimicheskoe modelirovaniye variatsiy khimicheskogo sostava solenyykh vod v protsesse ikh ispareniya (na primere ozer Zapadnoy Mongolii) [Physicochemical modeling of variations in chemical composition of saline waters in their evaporation (on the example of the lakes of Western Mongolia)]. *Materialy Vtoroy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proce. of the Second All-Russian Conference with International Participation]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2015. pp. 146–150.
 19. Davies C.W. The extent of dissociation of salts in water. Part VIII. An equation for the mean ionic activity coefficient of an electrolyte in water, and a revision of the dissociation constants of some sulphates. *Journal of the Chemical Society*, 1938, pp. 2093–2098.
 20. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
 21. Gaskova O.L., Isupov V.P., Vladimirov A.G., Shvartsev S.L., Kolpakova M.N. Thermodynamic Modeling of the Behavior of Uranium and Arsenic in Mineralized Shaaazgai-Nuur Lake (Northwest Mongolia). *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 465, no. 1, pp. 1159–1163.
 22. Sorokin D.Y, Banciau H.L., Muyzer G. Functional microbiology of soda lakes. *Current Opinion in Microbiology*, 2015, vol. 25, pp. 88–96.

Received: 21 September 2017.

Information about the authors

Marina N. Kolpakova, Cand. Sc., researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Russian Academy of Sciences; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga L. Gaskova, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Russian Academy of Sciences; professor, Novosibirsk State University.

Olga S. Naymushina, Cand. Sc., researcher V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Russian Academy of Sciences.

Sergey K. Krivonogov, Dr. Sc., leading researcher V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.643.001:536.2

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ВНЕШНЕМ КОНТУРЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Половников Вячеслав Юрьевич,
polov@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов и подтверждается основными положениями Энергетической стратегии России на период до 2030 г. Подземные трубопроводы широко используются при транспортировке жидкостей в различных областях, например, таких как водоснабжение и теплоснабжение, нефтепроводы и газопроводы, технологические трубопроводы промышленных предприятий. При проектировании систем такого рода необходимо учитывать теплообмен между грунтом и подземным трубопроводом, что во многих случаях оказывает существенное влияние на экономичность транспортировки энергоносителей.

Цель: численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия, исследование температурных полей и закономерностей теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов.

Объекты: типичные для систем транспортировки энергоносителей подземные двухтрубные бесканальные трубопроводы, проложенные в песчаных и глинистых грунтах. Трубопроводы изолированы пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена. Температуры на внутренней поверхности труб равны среднегодовым температурам энергоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику 95/70 °С. Температура окружающей среды равна средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

Методы: численное решение задач теплопереноса методом конечных элементов с использованием аппроксимации Галеркина, неравномерной конечно-элементной сетки, количество элементов которой выбирается из условий сходимости решения, гущение сетки проводится методом Делоне.

Результаты. Установлены масштабы тепловых потерь и закономерности теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия (изменение температуры грунта по глубине). Выявлено, что тепловые режимы подземных бесканальных трубопроводов с учетом и без учета изменения температуры грунта по глубине существенно отличаются друг от друга. Это обстоятельство может оказать заметное влияние в тех случаях, когда в зоне теплового влияния подземных трубопроводов расположены, например, смежные коммуникации или инженерные сооружения. Показана возможность проведения оценки тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с использованием модели и методики, не учитывающих изменение условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Ключевые слова:

Системы транспортировки тепловой энергии, подземные трубопроводы, тепловые потери, математическое моделирование, теплоперенос.

Введение

Подземные трубопроводы широко используются при транспортировке жидкостей в различных областях, например, таких как водо- и теплоснабжение, нефте- и газопроводы, технологические трубопроводы промышленных предприятий и др. При проектировании систем такого рода необходимо учитывать теплообмен между грунтом и подземным трубопроводом, что во многих случаях оказывает существенное влияние на экономичность транспортировки жидкостей [1]. Например, рост тепловых потерь от нефтепроводов приводит к изменению вязкости нефти из-за снижения ее температуры и, следовательно, к увеличению потребления электроэнергии перекачивающими насосами [1], а одной из причин перерасхода топлива, затрачиваемого на производство тепловой энергии, является интенсификация потерь в сетях теплоснабжения [2–4].

В настоящее время большое количество исследований посвящено тепловым режимам и тепловым потерям подземных трубопроводов [1–17]. В этих работах исследовано влияние различных факторов на эксплуатацию подземного трубопро-

водного транспорта: теплоперенос в грунте [1–4], влажность грунта [5], промерзание грунта [6], влияние периодического изменения температуры окружающей среды [7], замораживание трубопроводов [8], конвективного движения воздуха в каналах для прокладки трубопроводов [9], нестационарности процессов теплопереноса [10], а также, с учетом целого ряда допущений, создана методика прогнозирования тепловых потерь подземных трубопроводов [11–14]. Рассматриваемые задачи, наряду с аналитическими подходами [15–17], преимущественно решались численными методами.

Одним из допущений, при котором решены задачи теплопереноса [1–17], является допущение о том, что на внешнем контуре взаимодействия в грунте на некотором расстоянии от подземных трубопроводов градиент температуры равен нулю. Это допущение является недостаточно обоснованным, поскольку известно о значительном изменении температур грунта по глубине [18, 19].

Целью данной работы является численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Постановка задачи

Рассматривается типичная бесканальная прокладка тепловой сети – трубопроводы, изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [6, 17]. Схематическое изображение области решения приведено на рис. 1 и соответствует области решения для задачи, описанной в [6]. Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная стационарная задача теплопереноса в системе «подземный бесканальный трубопровод – окружающая среда» с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1. На границах между слоями выполняются условия идеального теплового контакта.
2. Теплофизические свойства веществ являются постоянными и известными величинами.
3. Не рассматриваются процессы теплопереноса в энергоносителях подающего и обратного трубопроводов.
4. На внутренних поверхностях труб подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам энергоносителей.

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы подземного бесканального трубопровода.

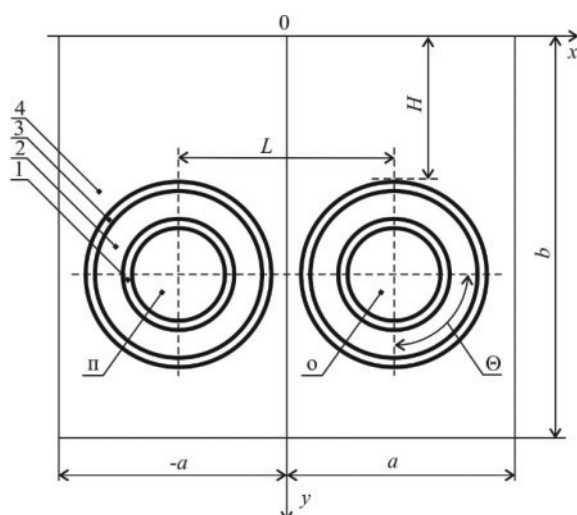


Рис. 1. Схема области решения: 1) металлическая стенка трубы; 2) теплоизоляционный слой; 3) слой гидроизоляции; 4) грунт; п, о – подающий и обратный теплопроводы; H – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; L – расстояние между осями трубопроводов; a, b – размеры области решения

Fig. 1. Scheme of solution region: 1) metal wall of the pipe; 2) heat-insulating layer; 3) waterproofing layer; 4) soil; п, о are the supply and return heat pipes; H is the distance from the soil surface to the upper points of the waterproofing layers; L is the distance between the axes of the pipes; a, b are the sizes of the solution region

Математическая модель

Математическая постановка задачи для рассматриваемой области решения (рис. 1) будет описываться уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для стенок труб, теплоизоляционных и гидроизоляционных слоев подающего и обратного трубопроводов:

$$\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=1-3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=1-3; \quad (2)$$

в грунте уравнением теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

При постановке задачи принималось, что на внутренних поверхностях труб подающего и обратного трубопроводов поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя в трубе:

$$T_{i,n} = T_n = \text{const}, \quad (4)$$

$$T_{i,o} = T_o = \text{const}. \quad (5)$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial x}, \quad T_{i,n} = T_{j,n}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (6)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial y}, \quad T_{i,n} = T_{j,n}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (7)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial x}, \quad T_{i,o} = T_{j,o}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (8)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial y}, \quad T_{i,o} = T_{j,o}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (9)$$

Для цилиндрических слоев выполняются условия симметрии:

$$\frac{\partial T_{i,n}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=1-3; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{i,o}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=1-3; \quad (11)$$

На левой и правой границах рассматриваемой системы температура грунта зависит от глубины и описывается уравнением, полученным на основании обработки данных приведенных в [19]:

$$T = 270,3 - 2,125y, \quad \text{при } x=\pm a. \quad (12)$$

На поверхности раздела «грунт – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \alpha(T_{4,b} - T_5), \quad \text{при } y=0. \quad (13)$$

На нижней поверхности задается постоянная температура, рассчитываемая по формуле (12):

$$T_{4,n} = T_n = \text{const, при } y=b. \quad (14)$$

Обозначения: T – температура, К; x, y, Θ – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Индексы: 1–4 – номера областей расчета (рис. 1); 5 – окружающая среда; п, о – подающий и обратный трубопроводы, в, н – верхняя и нижняя границы.

Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(14) решена методом конечных элементов с использованием аппроксимации Галерки на [20]. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [20].

Основное отличие задачи (1)–(14) от задачи, описанной в [6], заключается в учете наличия изменения температуры грунта по глубине (выражения (12) и (14)). При проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами $b = -6$ м в глубину и $a = \pm 5$ м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Исследования проводились для трубопроводов, конфигурация которых полностью соответствует описанной в [6]: диаметр условного прохода трубопроводов 600 мм, изготовлены из стали 10 (толщина стенки 8 мм), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 40 мм), покровный слой – полиэтилен (2 мм). Расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции принималось равным $H=2$ м, а между осями трубопроводов составляло $L=1,3$ м (рис. 1). Температуры $T_n=338$ К и $T_o=323$ К принимались равными среднегодовым температурам теплоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику 95/70 °С [6, 17]. Температура окружающей среды T_s принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [17] – 264,2 К. Температура нижней границы области решения, вычисленная по формуле (12), составляла $T_n=283,05$ К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

Таблица 1. Теплофизические характеристики [21]

Table 1. Thermophysical characteristics [21]

Материал Material	Покров- ный слой Cover layer	Тепловая изоляция Thermal insulation	Стенка трубы Pipe wall	Грунт/Soil	
				Глинистый Clay	Песчаный Sandy
λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	0,33	0,033	50,2	1,1	2,3
c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	2200	1470	462	1231	1486
ρ , кг/м³ kg/m³	920	50	7700	1700	2000

В табл. 1 приведены значения [21] теплопроводности (λ), теплоемкости (c) и плотности (ρ) грунта, стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении численных исследований.

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного анализа тепловых режимов и тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия приведены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается хорошим качественным согласованием полученных результатов с известными данными других авторов, например [11–14], и предыдущими исследованиями [6, 9]. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,2 %, что является приемлемым при анализе тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов.

В табл. 2 в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на верхней границе области решения и вида грунта в зоне размещения трубопроводов приведены тепловые потери рассматриваемой системы (рис. 1) Q_1 , полученные на основании решения системы уравнений (1)–(14), тепловые потери Q_2 [6], вычисленные для случая, когда изменение температуры грунта по глубине не учитывалось, а также представлено сопоставление Q_1 и Q_2 между собой и с нормативной величиной потерь Q_3 , рассчитанной в соответствии с [17, 19].

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Table 2. Results of numerical simulation

Грунт Soil	α	Q_1 , Вт/м W/m	Q_2 [6], Вт/м W/m	Q_3 , Вт/м W/m	$\delta_2 =$ $\frac{Q_3 - Q_1}{Q_1} 100 \%$	$\delta_1 =$ $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} 100 \%$
Песчаный Sandy	5	143,44	137,40	175,32	4,4	22,2
	10	144,75	140,48		3,0	21,1
	20	145,17	142,10		2,2	20,7
	30	145,87	142,65		2,3	20,2
Глинистый Clay	5	109,72	100,48	129,73	9,2	18,2
	10	110,38	102,15		8,0	17,5
	20	110,53	103,01		7,3	17,4
	30	110,84	103,30		7,3	17,0

Результаты численного моделирования тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь при прокладке трубопроводов в песчаных грунтах, имеющих большие коэффициенты теплопроводности (табл. 1). Также наблюдается закономерное возрастание потерь тепловой энергии с ростом интенсивности теплоотдачи на внешнем контуре рассматриваемой системы (рис. 1).

Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе раздела «грунт – окружающая среда» (табл. 2) позволяет сделать вывод о том, что увеличение теплоотдачи в 6 раз приводит к росту тепловых потерь не более чем на 2 %.

Сопоставление значений тепловых потерь подземных трубопроводов Q_1 и Q_2 позволяет сделать вывод о том, что при прокладке трубопроводов в песчаных грунтах потери тепла возрастают на $\delta_1=2,3-4,4$ %, а в глинистых на $\delta_1=7,3-9,2$ % в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на внешнем контуре взаимодействия (табл. 2).

Необходимо отметить, что в нормативной методике расчета тепловых потерь подземных трубопроводов [17, 19] отсутствует возможность учета многих факторов, влияющих на интенсификацию процессов теплопереноса, например, изменение характеристик грунта и условий теплообмена на границе «грунт – окружающая среда», наличие перепада температур в грунте по глубине и другие. Сопоставление результатов (табл. 2) численного моделирования Q_1 с величиной тепловых потерь Q_3 позволяет говорить о том, что отклонение между ними δ_2 составляет около 20 %. Это обстоятельство свидетельствует о том, что методика [17, 19] дает существенно завышенные значения тепловых потерь для подземных трубопроводов.

На рис. 2 и 3, в качестве примеров, приведены типичные температурные поля в зоне размещения

подземных бесканальных трубопроводов с учетом (рис. 2) и без учета (рис. 3) изменения температуры глинистого грунта по глубине при $\alpha=30$ Вт/(м²·К).

Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рис. 2, 3) сгущаются непосредственно над подземными трубопроводами и более разрежены при удалении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности и качественно согласуется с результатами предыдущих исследований [6, 9]. Рис. 2 наглядно демонстрирует существенную деформацию температурного поля в зоне прокладки подземных бесканальных трубопроводов с учетом изменения температуры грунта по глубине по сравнению с рис. 3, где этот фактор не учитывается. На рис. 3 изотермические линии смещены в сторону подающего трубопровода с более высокой температурой теплоносителя, а на рис. 2, для случая, когда учитывается изменение температуры грунта по глубине, температурное поле является практически симметричным относительно вертикальной оси рассматриваемой области решения.

Таким образом, тепловые режимы подземных бесканальных трубопроводов с учетом и без учета изменения температуры грунта по глубине существенно отличаются друг от друга. Это обстоятельство может оказать заметное влияние в тех случаях, когда в зоне теплового влияния подземных трубопроводов расположены, например, смежные коммуникации или инженерные сооружения. Од-

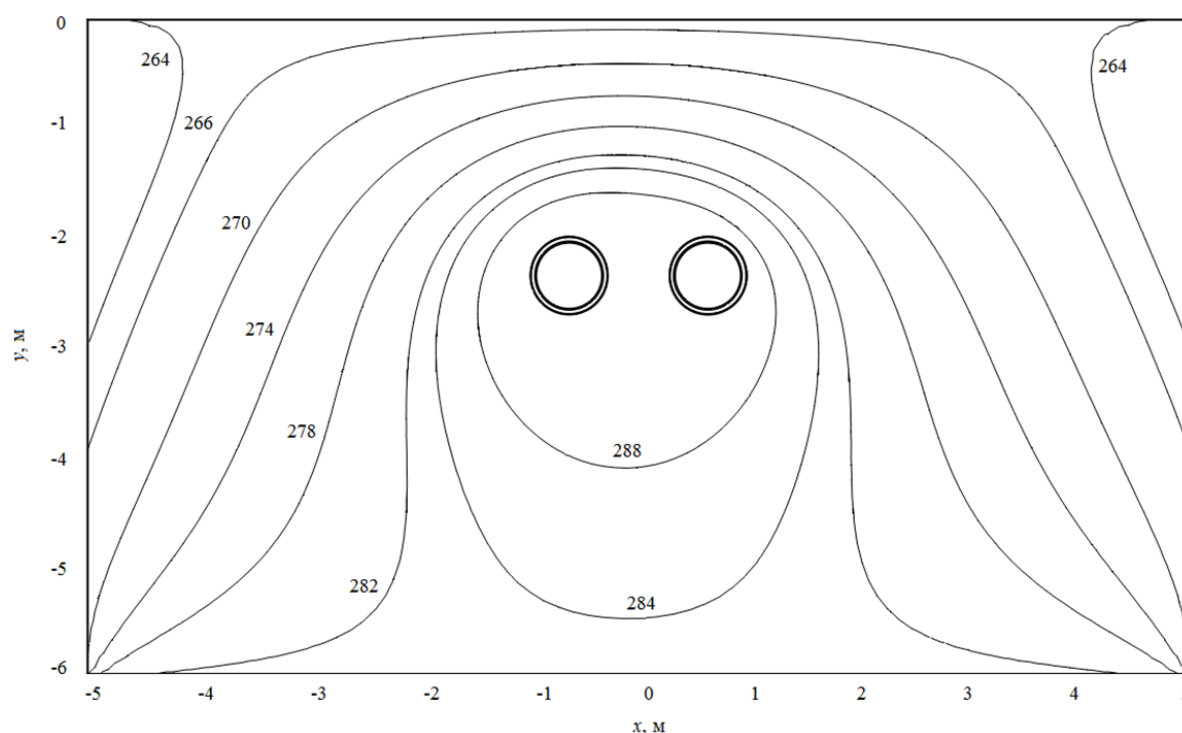


Рис. 2. Типичное температурное поле в зоне прокладки подземных трубопроводов с учетом изменения температуры грунта по глубине

Fig. 2. Typical temperature field in the zone of laying underground pipelines taking into account changes in soil temperature in depth

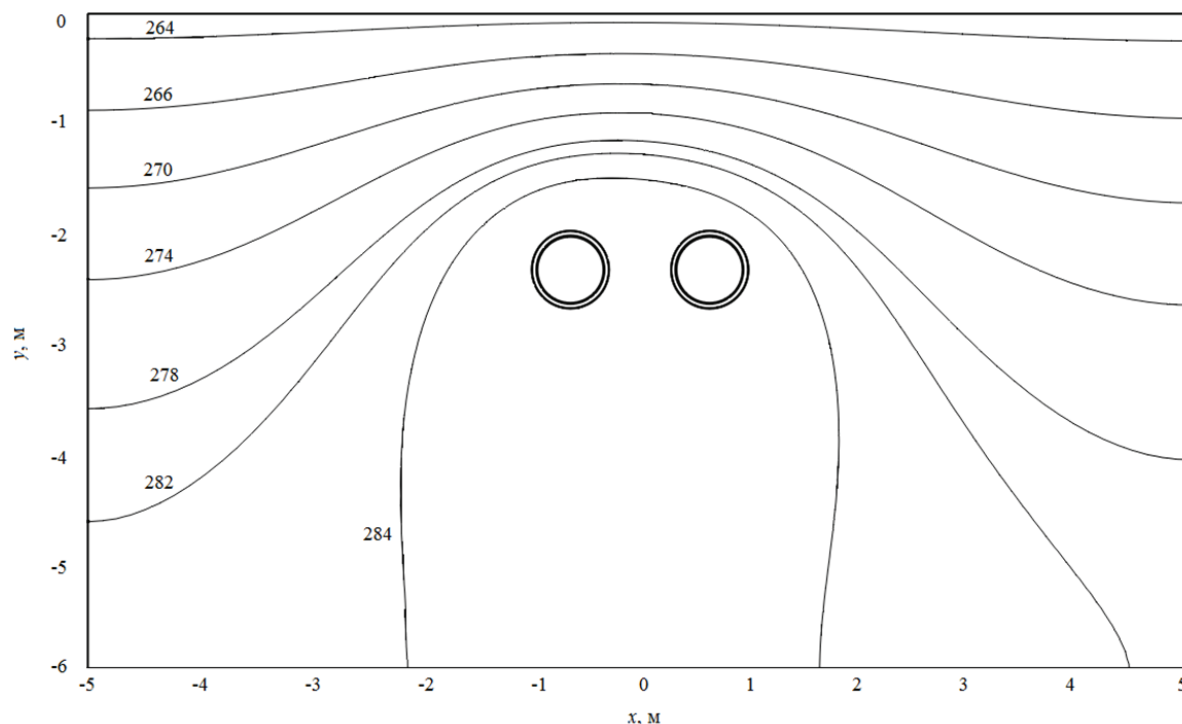


Рис. 3. Типичное температурное поле в зоне прокладки подземных трубопроводов без учета изменения температуры грунта по глубине

Fig. 3. Typical temperature field in the zone of laying underground pipelines neglecting changes in soil temperature in depth

нако при оценке тепловых потерь подземными трубопроводами, учитывая незначительное расхождение в расчетных значениях теплотерм Q_1 и Q_2 (табл. 2), можно обоснованно использовать более простую модель [6].

Закключение

Установлены масштабы тепловых потерь и закономерности теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на вне-

шнем контуре взаимодействия (изменение температуры грунта по глубине).

Показана возможность проведения оценки тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с использованием модели и методики, не учитывающих изменение условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00229-а и Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu T., Wang K. Numerical analysis of the heat transfer associated with freezing/solidifying phase changes for a pipeline filled with crude oil in soil saturated with water during pipeline shut-down in winter // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2008. – V. 62. – № 1–2. – P. 52–58.
2. Akhmetova I.G., Chichirova N.D. Evaluation of thermal insulation type impact on the value of regulatory heat losses in heat and power systems // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – V. 11. – № 13. – P. 2946–2949.
3. Dalla Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses // *Energy*. – 2011. – V. 36. – № 5. – P. 2407–2418.
4. Bohm B., Kristjansson H. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs // *International Journal of Energy Research*. – 2005. – V. 29. – № 14. – P. 1301–1312.
5. Шкрёкко С.В. Влияние влажности грунта на тепловые режимы бесканальных теплотрасс // *Известия Ростовского государственного строительного университета*. – 1998. – № 2. – С. 174–175.
6. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Тепловые потери бесканальных теплотрасс в условиях промерзания грунта в зоне прокладки // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. – 2012. – № 11–12. – С. 64–71.
7. Barletta A., Zanchini E., Lazzari S., Terenzi A. Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – V. 28. – № 10. – P. 1168–1176.
8. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange / N. Parfentieva, K. Valancius, O. Samarin, S. Paulauskaitė, J. Čiuprinskienė // *Mechanika*. – 2015. – V. 21. – № 5. – P. 393–396.
9. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2011. – V. 20. – № 2. – P. 217–224.
10. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground / J. Danielewicz, B. Sniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorow, H. Jouhara // *Energy*. – 2016. – V. 108. – P. 172–184.

11. Иванов В.В., Василенко В.В., Черныш С.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 1. – С. 66–69.
12. Дунин И.Л., Букаров Н.В. Расчет тепловых потерь при малых глубинах заложения теплопроводов // Известия ВУЗов. Строительство. – 1996. – № 2. – С. 83–84.
13. Определение тепловых потерь подземных канальных теплопроводов (Сообщение 1) / В.В. Иванов, В.И. Бабенков, И.Л. Дунин, К.В. Прушковский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 6. – С. 75–79.
14. Определение тепловых потерь подземных канальных теплопроводов (Сообщение 2) / В.В. Иванов, В.И. Бабенков, И.Л. Дунин, К.В. Прушковский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 8. – С. 89–93.
15. Bohm B. On transient heat losses from buried district heating pipes // International Journal of Energy Research. – 2000. – V. 24. – P. 1311–1334.
16. Muravyeva L., Vatin N. Elaboration of the method for safety assessment of subsea pipeline with longitudinal buckling // Advances in Civil Engineering. – 2016. – V. 2016. – Article ID 7581360.
17. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
18. СНиП 2.01.01–82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 57 с.
19. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию / под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.
20. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015 – 432 с.
21. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

Поступила 13.11.2017 г.

Информация об авторах

Половников В.Ю., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 621.643.001:536.2

THERMAL REGIMES AND THERMAL LOSSES OF UNDERGROUND PIPELINES IN REAL HEAT EXCHANGE ON THE OUTER INTERACTION BOUNDARY

Viacheslav Yu. Polovnikov,

polov@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop new approaches to the study of thermal regimes and thermal losses of underground pipelines and it is confirmed by the main provisions of the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Underground pipelines are widely used for transportation of liquids in various areas, for example, water supply and heat supply, oil pipelines and gas pipelines, technological pipelines of industrial enterprises. When designing an underground piping system, it is necessary to take into account heat exchange between the ground and the underground pipeline. In many cases this impacts significantly the economics of transportation of energy carriers.

The main aim of the research is a numerical analysis of thermal conditions and heat losses of underground channel-free pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary and investigation of temperature fields and patterns of heat transfer in the areas of placement of underground non-channel pipelines.

Objects of the research are the typical for energy transportation system underground two-pipe ductless pipelines laid in sandy and clay soils. Pipelines are insulated with polyurethane foam and protective covering waterproofing layer made of polyethylene. Temperature of energy carriers is equal to the average annual temperature of the energy carriers in the supply and return pipelines of the water heating networks during their operation according to the temperature schedule 95/70 °C. The ambient temperature is equal to the average air temperature for the heating period in the city of Tomsk. The average heat transfer coefficient at the ground-to-environment interface varied from 5 to 30 W/(m²·K).

Methods: numerical solution of heat transfer problems by the finite element method using the Galerkin approximation, non-uniform finite element mesh, the number of elements of mesh is chosen from the conditions of convergence of the solution; the grid is thickened by the Delaunay method.

Results. The authors have determined the magnitude of heat losses and the patterns of heat transfer in the zones of placement of underground non-channel pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary (change in soil temperature in depth). It was revealed that thermal conditions of underground non-channel pipelines, taking into account and without taking into account changes in soil temperature with respect to depth, differ significantly from each other. This circumstance can effect considerably in those cases where, for example, adjacent communications or engineering facilities are located in the zone of thermal influence of underground pipelines. The paper demonstrates the possibility of calculating thermal losses of underground non-channel pipelines using a model and methodology that do not take into account the change in heat exchange conditions on the outer interaction boundary.

Key words:

Thermal energy transportation system, underground pipelines, heat losses, mathematical modeling, heat transfer.

The study was partially supported by RFBR, research project No. 16–08–00229-a and within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. Lu T., Wang K. Numerical analysis of the heat transfer associated with freezing/solidifying phase changes for a pipeline filled with crude oil in soil saturated with water during pipeline shutdown in winter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, vol. 62, no. 1–2, pp. 52–58.
2. Akhmetova I.G., Chichirova N.D. Evaluation of thermal insulation type impact on the value of regulatory heat losses in heat and power systems. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 13, pp. 2946–2949.
3. Dalla Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 5, pp. 2407–2418.
4. Bohm B., Kristjansson H. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs. *International Journal of Energy Research*, 2005, vol. 29, no. 14, pp. 1301–1312.
5. Shkrebko S.V. Influence of soil humidity on thermal conditions of non-channel heating mains. *Izvestiya of Rostov State Building University*, 1998, no. 2, pp. 174–175. In Rus.
6. Polovnikov V.Yu., Khuzeev V.A. Thermal losses of non-channel heating mains in conditions of ground freezing in the zone of laying. *Izvestiya Vuzov. Energy problems*, 2012, no. 11–12, pp. 64–71. In Rus.
7. Barletta A., Zanchini E., Lazzari S., Terenzi A. Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, no. 10, pp. 1168–1176.
8. Parfentjeva N., Valančius K., Samarin O., Paulauskaitė S., Čiuprinskienė J. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange. *Mechanika*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 393–396.
9. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 217–224.
10. Danielewicz J., Sniechowska B., Sayegh M.A., Fidorow N., Jouhara H. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground. *Energy*, 2016, vol. 108, pp. 172–184.
11. Ivanov V.V., Vasilenko V.V., Chernyish S.V. To estimation of thermal losses of underground heating mains. *Izvestia Vuzov. Building*, 2000, no. 1, pp. 66–69. In Rus.
12. Dunin I.L., Bukarov N.V. Calculation of heat losses at shallow depths of heat pipelines. *Izvestia Vuzov. Building*, 1996, no. 2, pp. 83–84. In Rus.

13. Ivanov V.V., Babenkov V.I., Dunin I.L., Prushkovskiy K.V. Determination of thermal losses of underground duct heat pipes (Message 1). *Izvestia Vuzov. Construction and architecture*, 1990, no. 6, pp. 75–79. In Rus.
14. Ivanov V.V., Babenkov V.I., Dunin I.L., Prushkovskiy K.V. Determination of heat losses of underground duct heat pipes (Message2). *Izvestia Vuzov. Construction and architecture*, 1990, no. 8, pp. 89–93. In Rus.
15. Bohm B. On transient heat losses from buried district heating pipes. *International Journal of Energy Research*, 2000, vol. 24, pp. 1311–1334.
16. Muravyeva L., Vatin N. Elaboration of the method for safety assessment of subsea pipeline with longitudinal buckling. *Advances in Civil Engineering*, 2016, vol. 2016, Article ID 7581360.
17. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti* [District heating and heat networks]. Moscow, MEI Publ., 2001. 472 p.
18. *SNiP 2.01.01–82. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Building regulations 2.01.01–82. Building Climatology and Geophysics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 57 p.
19. Gromov N.K., Shubin E.P. *Vodyanye teplovyie seti: spravochnoe posobie po proektirovaniyu* [Water heating networks: a reference book on designing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 376 p.
20. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.
21. Guva A.Ya. *Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik* [Brief thermophysical reference book]. Novosibirsk, Sibvuzizdat Publ., 2002. 300 p.

Received: 13 November 2017.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.692.4

ОЦЕНКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Павлова Зухра Хасановна¹,
zpavlova@mail.ru

Азметов Хасан Ахметзиевич¹,
azmetov1939@yandex.ru

Абдрахманов Наиль Хадитович¹,
anailx@mail.ru

Павлова Анастасия Дмитриевна¹,
pavlovaad7@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. Изменения технологических параметров перекачки продукта в процессе эксплуатации нефтегазопроводов по сравнению со стационарными условиями работы приводят к возникновению дополнительных механических напряжений в стенке труб и к снижению запасов прочности. При этом заданный в стадии проектирования ресурс трубопроводов изменяется в сторону уменьшения. Возрастает риск возникновения аварийных ситуаций. Это обуславливает необходимость разработки методов оценки и обеспечения безопасности нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров эксплуатации.

Цель исследования: оценить и обеспечить безопасность эксплуатации нефтегазопроводов при нестационарности технологических параметров перекачки.

Объект исследования: трубопроводная система нефтегазовой отрасли.

Методы: теоретические исследования безопасности эксплуатации нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров режима перекачки.

Результаты. Получены аналитические зависимости запасов прочности трубопроводов от параметров нестационарности режима перекачки. Даны рекомендации по обеспечению безопасности нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров эксплуатации.

Выводы. В условиях нестационарности технологических параметров эксплуатации нефтегазопроводов в стенке их труб возникают повышенные механические напряжения, снижающие безопасность и ресурс сооружения. При одинаковых условиях нагружения внутренним давлением наибольшие напряжения возникают в сечениях соединения трубопровода с оборудованием, имеющим абсолютную жесткость на деформацию. Снижение уровня механических напряжений в стенке труб обеспечивается плавным регулированием режима перекачки, которое реализуется на нефтепроводах с помощью магистральных насосов, оснащенных частотно-регулируемым электроприводом. Обеспечение безопасности эксплуатации нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров перекачки может быть достигнуто регулированием режима перекачки продукта перекачивающими агрегатами, оснащенными регулируемым приводом.

Ключевые слова:

Трубопровод, эксплуатация, изменение режима перекачки, напряженно-деформированное состояние труб, запас прочности, механические напряжения, ресурс, безопасность.

Введение

Трубопроводная система нефтегазовой отрасли характеризуется нестационарностью технологических параметров эксплуатации. Основной причиной нестационарности является изменение производительности транспортировки продукта по трубопроводу. Повреждения труб, отказы электрооборудования и оборудования, изменения вязкости и плотности продукта перекачки, наличие самотечных участков нефте- и нефтепродуктопроводов, накопление всевозможных осадков в полости трубопровода также приводят к изменению режима перекачки работы трубопроводных систем и появлению нестационарности [1–3]. Вместе с тем устойчивой и безопасной работе трубопроводной системы нефтегазовой отрасли уделяется повышенное внимание [4–10].

При изменении скорости движения продукта, производительности перекачки, а также при запуске и остановке перекачивающих агрегатов возникает волна повышенного или пониженного давления в полости трубопровода. Изменение режима перекачки продукта оказывает наиболее существенное влияние на безопасность трубопроводных систем [11–14]. Максимальное воздействие нестационарности технологических параметров наблюдается на перекачивающих жидкие продукты трубопроводах.

В современных условиях развитие нефтегазовой отрасли связано с созданием мощной сети трубопроводов при жестком режиме эксплуатации. Сложные условия сооружения и жесткие режимы эксплуатации трубопроводов могут привести к их повреждениям с потерей герметичности, сопро-

возрастающим загрязнением окружающей среды и значительными затратами. Одним из основных направлений развития трубопроводных систем является дальнейшее совершенствование методов и средств обеспечения их безопасности, учитывающих реальные нестационарные условия эксплуатации [15–17].

В настоящее время для условий нестационарности технологических параметров эксплуатации отсутствуют как научно обоснованные эффективные методы, направленные на снижение влияния нестационарности на безопасность трубопроводов, так и методы оценки запаса прочности и риска аварий трубопроводных систем.

О методике исследований

Метод оценки безопасной эксплуатации трубопроводных систем включает в себя определения запаса прочности и максимальных механических напряжений в стенке труб, а также оценки риска аварии и условий предотвращения недопустимых деформаций стенки трубы. Интенсивность и риск аварий снижаются при повышении запасов прочности. В связи с этим закономерности изменения запасов прочности в зависимости от характера изменений давления в полости трубопровода, геометрических характеристик труб, механических свойств их металла в полной мере характеризуют закономерности изменений риска аварий от указанных исходных данных.

При эксплуатации происходит местный изгиб стенки труб из-за возникновения разности возрастных их радиуса в сечениях сопряжения участков трубопровода с разными внутренними давлениями, вызванными изменениями режима перекачки и различными геометрическими характеристиками. В указанных сечениях имеет место появление наибольших механических напряжений, с учетом которых определяются запасы прочности и оценивается безопасность трубопровода.

Эффективным методом обеспечения безопасности трубопроводных систем, который позволяет снизить интенсивность изменения скорости движения продукта и приводит к уменьшению локального повышения давления, в условиях переходного процесса движения нефти и нефтепродукта, вызванного изменением производительности их транспортировки, является метод плавного регулирования режима перекачки. Интенсивность изменения скорости движения продукта и локальное повышение давления при этом зависят от изменений напора, создаваемого магистральными насосами, и потерь напора на трение в трубопроводе, зависящих от режима течения жидкости и её свойств [1, 2, 15]. Плавное регулирование режима перекачки, например, на нефтепроводах реализуется с помощью магистральных насосов, оснащенных частотно-регулируемыми электроприводами [18]. Частотно-регулируемый электропривод равномерно и плавно регулирует производительность перекачки соответствующим изменением частоты

вращения вала магистрального насоса в течение определенного промежутка времени. Значение промежутка времени изменения частоты вращения вала магистрального насоса, обеспечивающее требуемую плавность регулирования производительности перекачки, определяется с использованием баланса напоров для магистрального нефтепровода, в котором проводится регулирование. Баланс напоров формируется с учетом напорных характеристик и количества перекачивающих продукт насосов, протяженности и геодезических отметок начала и конца нефтепровода, свойств перекачиваемого продукта и характера его течения [19]. С целью повышения безопасности необходимо установить зависимость максимальных напряжений, запасов прочности и риска аварий от протяженности участка трубопровода, на котором происходит изменение внутреннего давления и который характеризует плавное изменение режима перекачки.

Запасы прочности определяются по формулам:

$$n_b = \frac{\sigma_b}{\sigma_{\max}}; \quad (1)$$

$$n_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\max}}, \quad (2)$$

где σ_b и σ_t – предел прочности и предел текучести металла трубы, МПа; $\sigma_{\max}$ – максимальные напряжения в стенке трубы (напряжения изгиба, кольцевые напряжения, эквивалентные напряжения), МПа.

Величины запасов прочности n_b принимают в пределах 1,7...2,5; n_t – в пределах 1,2...2,0 [20].

Для определения максимальных напряжений в стенке трубы воспользуемся теорией тонкостенных оболочек, изложенной в работе [21]. К тонкостенным оболочкам относятся трубы, используемые для сооружения нефтегазопроводов с номинальным диаметром 530 мм и более, у которых отношение толщин стенок к радиусу меньше 1/30. В результате получены расчетные формулы для определения максимальных напряжений изгиба и суммарных кольцевых напряжений. При возникновении местной деформации сечения трубы из-за изменений внутреннего давления и геометрических характеристик трубопровода его стенка подвергается одновременно воздействию внутреннего давления и изгиба, в связи с чем проверка прочности этого сечения выполняется на основе энергетической теории прочности с определением эквивалентных напряжений, включающих максимальные напряжения изгиба $\sigma_{\text{изг}}$ и суммарные кольцевые напряжения $\sigma_{\text{к.с.}}$. В связи с этим и с целью оценки безопасности трубопроводов в исследуемых условиях получены также расчетные формулы для вычисления максимальных эквивалентных напряжений.

Условие предотвращения недопустимых деформаций стенки трубы с учетом вычисленных максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв.м}}$ (МПа), имеет вид [22]:

$$\sigma_{\text{экв.м}} \leq R_2^{\text{н}}, \quad (3)$$

где $R_2^{\text{н}}$ – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла трубы, принимаемое равным минимальному значению предела текучести, МПа.

Расчетная формула для определения максимальных напряжений изгиба (МПа) имеет вид

$$\sigma_{\text{и}} = \pm \sigma_{\text{кц}} \cdot \bar{\sigma}_{\text{и}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{кц}}$ – кольцевые напряжения (МПа) от действия рабочего давления p (МПа), определяемые по формуле

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{p \cdot R}{\delta}; \quad (5)$$

R – радиус срединной поверхности стенки трубы, см; δ – толщина стенки трубы, см.

Наибольшие суммарные кольцевые напряжения $\sigma_{\text{кц.с}}$ представляют из себя сумму напряжений, определяемых по (5), и кольцевого напряжения $\sigma_{\text{кц.и}}$ (МПа), возникающего в результате действия продольного напряжения изгиба $\sigma_{\text{и}}$ и равного

$$\sigma_{\text{кц.и}} = -\nu \cdot \sigma_{\text{и}}, \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона, для стали $\nu=0,3$.

Таким образом, для определения $\sigma_{\text{кц.с}}$ (МПа) имеем

$$\sigma_{\text{кц.с}} = \sigma_{\text{кц}} \cdot \bar{\sigma}_{\text{кц.с}}. \quad (7)$$

Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв.м}}$ (МПа) определяются по формуле

$$\sigma_{\text{экв.м}} = \sigma_{\text{кц}} \cdot \bar{\sigma}_{\text{экв.м}}. \quad (8)$$

В расчетных формулах (4), (7) и (8) через $\bar{\sigma}_{\text{и}}$, $\bar{\sigma}_{\text{кц.с}}$ и $\bar{\sigma}_{\text{экв.м}}$ обозначены безразмерные параметры соответственно максимальных напряжений изгиба, суммарного кольцевого напряжения и эквивалентного напряжения.

Анализ влияния параметров режима перекачки на прочность и безопасность трубопроводных систем

Уменьшения локального повышения давления и наибольших напряжений могут быть достигнуты за счет снижения интенсивности изменения скорости движения продукта во времени и величины изменения этой скорости, что достигается с помощью магистральных насосов, оснащенных частотно-регулируемым электроприводом. Поскольку производительность, которая задается производственной необходимостью, определяет изменение скорости движения потока, избежать локальных изменений давления можно путем снижения интенсивности изменения скорости движения продукта. Установлена зависимость максимальных напряжений и запасов прочности от протяженности участка трубопровода, на котором происходит изменение внутреннего давления.

Указанные выше безразмерные параметры $\bar{\sigma}_{\text{и}}$, $\bar{\sigma}_{\text{кц.с}}$ и $\bar{\sigma}_{\text{экв.м}}$ определяются в зависимости от соотношения $\Delta p/p$ (p – рабочее давление, Δp – величина локального повышения давления вследствие изменения режима перекачки), интенсивности измене-

ния внутреннего давления, геометрических характеристик труб и их соединений, свойств металла труб. Для участка трубопровода, имеющего постоянную толщину стенки, получены следующие аналитические зависимости:

$$\bar{\sigma}_{\text{и}} = 1,8157 \frac{\Delta p}{p \cdot a_0}, \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_{\text{кц.с}} = 1 + \frac{\Delta p}{p} \left(1 + 0,5447 \frac{1}{a_0} \right), \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{\text{экв.м}} = \left[\left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right)^2 + 4,5824 \left(\frac{\Delta p}{p \cdot a_0} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2,9051 \frac{\Delta p}{p \cdot a_0} \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Здесь безразмерная величина $a_0 = \beta_0$, где β – параметр, определяемый в зависимости от геометрических характеристик трубы и механических свойств её металла. Например, для стальной трубы с наружным диаметром 102 см и толщиной стенки 1,1 см значение $\beta=0,1725$ (1/см); ℓ_0 – протяженность участка трубопровода, на котором происходит изменение внутреннего давления от p до $(p+\Delta p)$. Величина a_0 для конкретного трубопровода характеризует протяженность ℓ_0 .

В табл. 1 приведены зависимости напряжений $\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{кц.с}}$ и $\sigma_{\text{экв.м}}$ от протяженности ℓ_0 при значениях $\Delta p/p=0,1$ и $\Delta p/p=0,5$ для трубопровода с наружным диаметром 122 см, толщиной стенки 1,4 см при $p=4,0$ МПа, $\sigma_{\text{в}}=550,0$ МПа, $\sigma_{\text{Т}}=350,0$ МПа.

Таблица 1. Значения напряжений $\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{кц.с}}$ и $\sigma_{\text{экв.м}}$ при различных значениях ℓ_0 и $\Delta p/p$

Table 1. Values of tensions $\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{кц.с}}$ and $\sigma_{\text{экв.м}}$ for different values of ℓ_0 and $\Delta p/p$

ℓ_0 , см	10,0	25,0	50,0	100,0	150,0	200,0	300,0
$\Delta p/p=0,1$							
$\sigma_{\text{и}}$	21,4	9,2	4,5	2,2	1,5	1,1	0,7
$\sigma_{\text{кц.с}}$	195,0	192,3	190,9	190,2	190,0	189,9	189,8
$\sigma_{\text{экв.м}}$	207,5	197,0	193,2	191,3	190,7	190,4	190,1
$\Delta p/p=0,5$							
$\sigma_{\text{и}}$	107,2	46,0	22,7	11,2	7,4	5,6	3,7
$\sigma_{\text{кц.с}}$	290,9	272,2	270,3	260,6	260,3	260,1	259,6
$\sigma_{\text{экв.м}}$	356,5	297,9	282,3	266,4	264,1	262,9	261,4

Анализ показывает, что в условиях нестационарности напряжения в стенке труб достигают значительных величин. Так, например, по данным табл. 1, при $\Delta p/p=0,5$ и $\ell_0=10$ см условие (3) не обеспечено.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить влияние исходных данных на запасы прочности. Для общности анализа, который будет применим для всех диаметров труб при различных прочностных характеристиках $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{Т}}$

металла, используем безразмерные параметры $\bar{\sigma}_B$, $\bar{\sigma}_T$, $\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ.М}}$, равные

$$\bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_B \cdot \delta_H}{p \cdot R}; \quad (12)$$

$$\bar{\sigma}_T = \frac{\sigma_T \cdot \delta_H}{p \cdot R}; \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ.М}} = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ.М}} \cdot \delta}{p \cdot R}. \quad (14)$$

Используя (1), (2) и (12)–(14) для запасов прочности n_B и n_T , можно записать:

$$n_B = \frac{\bar{\sigma}_B}{\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ.М}}}; \quad (15)$$

$$n_T = \frac{\bar{\sigma}_T}{\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ.М}}}. \quad (16)$$

Некоторые результаты расчета коэффициентов запаса прочности при различных a_0 в условиях изменения давления в трубопроводе от p до $(p+\Delta p)$ получены в результате расчета по формулам (11), (15) и (16), приведены в табл. 2, где приняты $\bar{\sigma}_B=2,5$; $\bar{\sigma}_T=1,9$ и различные значения $\Delta p/p$.

Табл. 2. Зависимости коэффициентов запаса прочности n_B и n_T от параметра a_0 на участке трубопровода с постоянной толщиной стенки

Table 2. Dependences of safety factors n_B and n_T on parameter a_0 on the pipeline section with a constant wall thickness

$\Delta p/p$	a_0	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
0,25	n_B	1,51	1,90	1,95	1,96	1,97	1,98
	n_T	1,14	1,44	1,48	1,49	1,50	1,51
0,5	n_B	1,06	1,52	1,59	1,61	1,63	1,64
	n_T	–	1,16	1,21	1,23	1,24	1,25

В сечении соединения трубопровода с оборудованием, имеющим абсолютную жесткость на деформацию (запорная арматура и т. п.), имеется наибольшая разница радиальных перемещений стенок соединяемых изделий под действием внутреннего давления, и поэтому в этом сечении возникают наибольшие напряжения изгиба. Эти напряжения определяются по формуле (4), где

$$\bar{\sigma}_H = 1,8157 \cdot \left(1 + \frac{\Delta p}{pa_0} \right). \quad (17)$$

С учетом (6) для кольцевых напряжений в анализируемом сечении имеем (7), где

$$\bar{\sigma}_{\text{КЦ.С}} = 0,5447 \cdot \left(1 + \frac{\Delta p}{pa_0} \right). \quad (18)$$

Максимальные эквивалентные напряжения определяются по формуле (8), где

$$\bar{\sigma}_{\text{ЭКВ.М}} = 2,1407 \cdot \left(1 + \frac{\Delta p}{pa_0} \right). \quad (19)$$

Анализ расчетов по полученным расчетным формулам показывает, что повышение параметров p и Δp существенно увеличивает уровень механических напряжений в трубопроводе.

Сопоставление и обсуждение результатов исследований

В условиях стационарного режима работы для вышеуказанного трубопровода диаметром 122 см с толщиной стенки 1,4 см при внутреннем давлении 6,0 МПа наибольшие суммарные кольцевые напряжения равны 258,4 МПа, напряжения изгиба равны нулю (т. к. отсутствуют локальные повышения давления Δp и увеличение радиуса трубопровода). Внутреннее давление 6,0 МПа соответствует условию $\Delta p/p=0,5$, $p=4,0$ МПа при нестационарной работе трубопровода, уровни напряжений для которого приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, напряжения в условиях нестационарности существенно выше, и с увеличением ℓ_0 напряжения снижаются, приближаясь к уровню стационарного режима перекачки.

На основании расчетов установлено, что запасы прочности можно значительно повысить за счет регулирования параметров изменения режима перекачки. Исходя из зависимостей коэффициентов запаса прочности n_B и n_T от протяженности ℓ_0 , получено, что увеличение ℓ_0 (от нуля до некоторой величины) приводит к существенному снижению максимальных эквивалентных напряжений. Дальнейшее увеличение ℓ_0 не оказывает существенного влияния на повышение запасов прочности. На основании данной закономерности зависимость между рациональной протяженностью $\ell_{0,p}$ и отношением $\Delta p/p$ для участка трубопровода с постоянной толщиной стенки имеет вид:

$$\ell_{0,p} = \bar{\ell}_{0,p} \sqrt{R \cdot \delta}, \quad (20)$$

где

$$\bar{\ell}_{0,p} = 15,5594 \left(\frac{\Delta p}{p} + 1 \right). \quad (21)$$

В табл. 3 приведены значения рациональной протяженности $\ell_{0,p}$ для различных значений $\Delta p/p$ и диаметров с соответствующей толщиной стенки.

Табл. 3. Значения рациональной протяженности $\ell_{0,p}$

Table 3. Values of rational length $\ell_{0,p}$

$D_H \times \delta$, см	53×0,9	72×1,0	102×1,1	122×1,4	142×1,7
$\Delta p/p = 0,1$					
$\ell_{0,p}$, см	82,9	102,0	127,5	157,3	186,9
$\Delta p/p = 0,25$					
$\ell_{0,p}$, см	94,2	115,9	144,9	178,7	212,4
$\Delta p/p = 0,5$					
$\ell_{0,p}$, см	113,0	139,1	173,9	214,4	254,9

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке, показывает, что увеличение параметра a_0 до

20,0 приводит к существенному повышению запаса прочности n_s вследствие снижения наибольших напряжений.

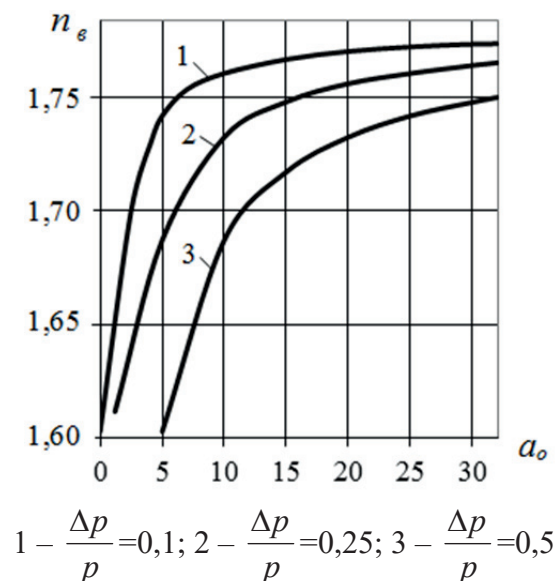


Рисунок. Графические зависимости n_s от a_0 при $\bar{\sigma}_s = 3,72$ и различных $\Delta p/p$ для сечения соединения трубопровода с оборудованием, имеющим абсолютную жесткость на деформацию

Figure. Graphical dependences of n_s on a_0 at $\bar{\sigma}_s = 3,72$ and different $\Delta p/p$ for pipeline connection section with equipment having absolute rigidity for deformation

Рациональная протяженность $\ell_{o,p}$ для сечения соединения трубопровода с оборудованием может быть определена из аналитического выражения (20), где

$$\bar{\ell}_{o,p} = 15,5594 \left(2 \frac{\Delta p}{p} + 1 \right). \quad (22)$$

В табл. 4 даны значения рациональной протяженности $\ell_{o,p}$ для различных $\Delta p/p$, толщин стенок и диаметров труб.

Табл. 4. Значения рациональной протяженности $\ell_{o,p}$ для различных диаметров труб и некоторых значений $\Delta p/p$

Table 4. Values of rational length $\ell_{o,p}$ for different pipe diameters and certain values of $\Delta p/p$

$D_n \times \delta$, см	53×0,9	72×1,0	102×1,1	122×1,4	142×1,7
$\Delta p/p = 0,1$					
$\ell_{o,p}$, см	89,6	112,0	138,2	171,8	203,5
$\Delta p/p = 0,25$					
$\ell_{o,p}$, см	112,0	134,0	172,7	214,7	254,4
$\Delta p/p = 0,5$					
$\ell_{o,p}$, см	149,4	185,7	230,3	286,3	339,2

Увеличения диаметров труб и отношения $\Delta p/p$ приводят к повышению рациональной протяженности $\ell_{o,p}$.

Заключение

Изложены основные исходные положения оценки и обеспечения безопасности эксплуатации нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров их функционирования.

В результате исследования получены аналитические зависимости, позволяющие оценить запасы прочности трубопроводов с учетом внутреннего давления, его изменений из-за нестационарности режима перекачки продукта, регулирования режима перекачки, геометрических характеристик труб и их соединений, механических свойств металла труб. Анализ показал, что в условиях нестационарности режима перекачки без его регулирования уровень механических напряжений в стенке труб в ряде случаев превышает нормативные значения.

Проведен анализ влияния параметров регулирования режима перекачки, геометрических характеристик труб и их соединений на уровень механических напряжений и запасы прочности трубопроводов.

Установлено, что при одинаковых условиях нагружения наибольшие напряжения возникают в сечениях соединения трубопровода с оборудованием, имеющим абсолютную жесткость на деформацию. В указанном сечении по сравнению с участком трубопровода из труб с равными толщинами стенок при $\Delta p/p = 0,75$ и $a_0 = 5,0$ максимальные напряжения изгиба больше в 7,5 раза, а максимальные эквивалентные – в 1,25 раза. Соответственно меньше запасы прочности по напряжению изгиба и по эквивалентному напряжению. Анализ показал, что в ряде случаев нестационарности уровень напряжений и запасы прочности не соответствуют нормативным требованиям.

Выявлено, что изменение производительности трубопровода за счет применения магистральных насосных агрегатов, оснащенных регулирующим частоту вращения вала насоса приводом, обеспечивает плавные изменения внутреннего давления, значительное снижение максимальных напряжений в стенке труб и повышение запаса прочности. Для реальных условий плавное изменение режима перекачки позволяет повысить запасы прочности трубопровода в сечении его соединения с оборудованием от 1,2 до 2,4 раза. Показано, что с увеличением протяженности участка трубопровода, на котором происходит изменение режима перекачки (внутреннего давления, скорости движения перекачиваемого продукта), происходит снижение уровня напряженного состояния трубопровода. Выявлено наличие рациональной протяженности участка плавного изменения режима перекачки продукта, больше которой не происходит существенного снижения наибольших напряжений и увеличения запасов прочности. Увеличение запасов прочности снижает риск аварии и повышает безопасность эксплуатации нефтегазопроводов.

Регулирование режима перекачки продукта в условиях нестационарности технологических параметров перекачивающими агрегатами, оснащен-

ными регулируемым приводом, обеспечивает безопасность эксплуатации нефтегазопроводов на приемлемом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
2. РД 75.180.00.-КТН-258–10. Методика расчета нестационарных технологических режимов работы магистральных нефтепроводов. – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2010. – 118 с.
3. Hofstatter H., Pavlov M., Mastobaev B.N. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil // Научные труды НИПИНефтегаз ГНКАР, 2014. – № 4. – С. 35–39.
4. True W. Pipeline safety progress noted at API pipeline conference // Oil & Gas Journal. – 2002. – Т. 100. – № 18. – С. 38–40.
5. Saleem O., Kovach S. Facility risk profile: a methodology of putting various risk assessment information to work // SPE International Conference on Health, Safety and Environment 2014: the Journey Continues. – Long Beach, CA; United State, 2014. – V. 2. – P. 703–706.
6. Application of probabilistic methods for predicting the remaining life of offshore pipelines / A.A. Aljaroud, P.B. Thodi, A.A. Akin-turk, F.A. Khan, M.B. Paulin // Proc. of the 10th Biennial International Pipeline Conference, IPC. – Calgary, Canada, 2014. – V. 4. – P. 26.
7. James B., Hudgins A. Handbook of Materials failure analysis with case studies from the oil and gas industry. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 2015. 430 p.
8. Integrity management of pipelines transporting hydrocarbons: an integrated approach / G. Gabetta, S. Morrea, F. Travaglia, P. Cioffi, S. Monaco // SPE – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2015. – Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2015. – P. 17.
9. Mohitpour M., McManus M., Trefanenko B. Trends in pipeline integrity inspection and rehabilitation techniques // Proc. of the 4th International pipeline conference, ASME. – Calgary, Canada, 2002. – V. B. – P. 1493–1500.
10. Pettitt G., Westfall S. The advantages of integrating major Accident hazards and ESIA for Pipeline Project // Proc. of the 11th Biennial International Pipeline Conference, IPC. – Calgary, Canada, 2016. – V. 2. – P. 23.
11. Зайнуллин Р.С., Гумеров А.Г. Повышение ресурса нефтепроводов. – М.: Изд-во «Недра», 2000. – 494 с.
12. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Р.С. Гумеров, Х.А. Азметов. – М.: Изд-во «Недра», 1998. – 240 с.
13. Павлова З.Х. Исследование напряженно-деформированного состояния труб магистральных нефтепроводов в условиях изменений технологического режима перекачки // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 1. – Т. 12. – С. 91–96.
14. Research on the automatically trajectory control of a spherical isolation plug in subsea pipeline / X.Zhu, H.Wang, F.Li, Y.Quan, W.Wang, S.Zhang // Ocean Engineering. – 2017. – V. 141. – P. 101–107.
15. Чионов А.М., Черепанов А.В. Моделирование системы трубопроводов с различной пропускной способностью в нестационарном режиме // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). – 2015. – № 4 (50). – С. 18–21.
16. Система непрерывного контроля режимов работы при частотном регулировании насосного агрегата / М.Ю. Земенкова, И.В. Сероштанов, Ю.Д. Земенков, К.С. Воронин // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). – 2015. – № 4 (50). – С. 34–36.
17. Кулик В.С., Казак А.С., Храбров Ю.И. Оптимизация режимов функционирования магистральных систем транспорта газа при изменении производительности // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). – 2015. – № 5 (51). – С. 38–42.
18. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Павлова З.Х. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов и технологического режима перекачки при кратковременных нарушениях электроснабжения. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. – 171 с.
19. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2011. – 571 с.
20. Махутов Н.А., Пермяков В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 2005. – 516 с.
21. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1970. – 544 с.
22. СП 36.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85*). Магистральные трубопроводы. – М., 2012. – 78 с.

Поступила 24.10.2017 г.

Информация об авторах

Павлова З.Х., доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Азметов Х.А., доктор технических наук, профессор кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Абдрахманов Н.Х., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Павлова А.Д., магистрант кафедры промышленной безопасности и охраны труда Уфимского государственного нефтяного технического университета.

УДК 622.692.4

ASSESSMENT AND SAFETY OF OPERATION OF OIL AND GAS PIPELINES IN NON-STEADY CONDITIONS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Zukhra Kh. Pavlova¹,

zpavlova@mail.ru

Khasan A. Azmetov¹,

azmetov1939@yandex.ru

Nail Kh. Abdrakhmanov¹,

anailx@mail.ru

Anastasia D. Pavlova¹,

pavlovaad7@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance. Changes in technological parameters of product pumping at oil and gas pipelines operation in comparison with the stationary operating condition leads to appearance of additional mechanical stresses in the wall of pipes and to decrease in margin of safety. At the same time, the pipeline resource specified in the project changes to decrease. The risk of failures increases. This substantiates the development of methods for assessing and ensuring the safety of oil and gas pipelines in conditions of non-stationarity of technological parameters of operation.

The main aim of the research is to assess and ensure the safety of operation of oil and gas pipelines at non-stationarity of pumping technological parameters.

Object: pipeline system of oil and gas industry.

Methods: theoretical studies of oil and gas pipeline operation safety in conditions of non-stationarity of technological parameters of the pumping regime.

Results. The authors have obtained the analytical dependences of pipelines strength on parameters of non-stationarity of pumping regime and recommended to ensure safety of oil and gas pipelines in conditions of non-stationarity of technological operating parameters.

Conclusions. In non-stationarity conditions of oil and gas pipelines technological parameters while operation, in the wall of their pipes, the increased mechanical stresses occur that reduce the safety and life of the structure. Under the same conditions of inner pressure, the highest stresses arise in section of pipeline connection with equipment which have absolute rigidity for deformation. Mechanical stresses reduction in pipeline wall is provided by pumping regime smooth regulation, which is realized on oil pipelines by means of the main pumps, equipped with frequency-regulated electric drive. The pipelines exploitation safety in non-stationarity conditions of pumping technological parameters can be reached by pumping regime regulation with use of frequency-regulated electric drive.

Key words:

Pipeline, exploitation, change of transfer mode, stress-strain state of pipes, margin of safety, mechanical stress, useful life, safety.

REFERENCES

1. Lure M.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov truboprovodnogotransportanefi, nefteproduktovigaza* [Mathematical modeling of pipeline transportation of oil, oil products and gas]. Moscow, Neftgaz Publ., 2003. 336 p.
2. RD 75.180.00.-КТN-258–10. *Metodika rascheta nestatsionarnykh tekhnologicheskikh rezhimov raboty magistralnykh nefteprovodov* [Method of calculation of non-stationary technological modes of operation of main oil pipelines]. Moscow, Transneft Publ., 2010. 118 p.
3. Hofstatter H., Pavlov M., Mastobaev B.N. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil. *Scientific works of NIPI Neftegaz GNKAR*, 2014, no. 4, pp. 35–39.
4. True W. Pipeline safety progress noted at API pipeline conference. *Oil & Gas Journal*, 2002, vol. 100, no. 18, pp. 38–40.
5. Saleem O., Kovach S. Facility risk profile: A methodology of putting various risk assessment information to work. *SPE International Conference on Health, Safety and Environment 2014: the Journey Continues*. Long Beach, CA, United State, 2014. Vol. 2, pp. 703–706.
6. Aljaroudi A.A., Thodi P.B., Akinturk A.A., Khan F.A., Paulin M.B. Application of probabilistic methods for predicting the remaining life of offshore pipelines. *Proc. of the 10th Biennial International Pipeline Conference, IPC*. Calgary, Canada, 2014. Vol. 4, pp. 26.
7. James B., Hudgins A. *Handbook of Materials failure analysis with case studies from the oil and gas industry*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2015. 430 p.
8. Gabetta G., Morrea S., Travaglia F., Cioffi P., Monaco S. Integrity management of pipelines transporting hydrocarbons: An integrated approach. *SPE – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2015*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2015. pp. 17.
9. Mohitpour M., McManus M., Trefanenko B. Trends in pipeline integrity inspection and rehabilitation techniques. *Proc. of the 4th International pipeline conference, ASME*. Calgary, Canada, 2002. Vol. B, pp. 1493–1500.
10. Pettitt G., Westfall S. The advantages of integrating major Accident hazards and ESIA for Pipeline Project. *Proc. of the 11th Biennial International Pipeline Conference, IPC*. Calgary, Canada, 2016. Vol. 2, pp. 23.
11. Zaynullin R.S., Gumerov A.G. *Povyishenie resursa nefteprovodov* [Increase in the resource of oil pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 494 p.
12. Gumerov A.G., Yamaleev K.M., Gumerov R.S., Azmetov Kh.A. *Defektnost trubnefteprovodov i metodykh remonta* [Defectiveness of oil pipelines and methods of repair]. Moscow, Nedra Publ., 2000. 128 p.

- ess of oil pipelines and methods of their repair]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 240 p.
13. Pavlova Z.Kh. Study of the stress-strain state of trunk oil pipelines in conditions of changes in technological pumping regime. *Oil and gas business*, 2014, no. 1, pp. 91–96. In Rus.
 14. Zhu X., Wang H., Li F., Quan Y., Wang W., Zhang S. Research on the automatically trajectory control of a spherical isolation plug in subsea pipeline. *Ocean Engineering*, 2017, vol. 141, pp. 101–107.
 15. Chionov A.M., Cherepanov A.V. Modeling of a system of pipelines with various capacity in non-stationary mode. *Pipeline Transport (Theory and Practice)*, 2015, no. 4 (50), pp. 18–21. In Rus.
 16. Zemenkova M.Yu., Seroshtanov I.V., Zemenkov Yu.D., Voronin K.S. System of continuous monitoring of operating modes for control of the pump unit. *Pipeline transport (Theory and practice)*, 2015, no. 4 (50), pp. 34–36. In Rus.
 17. Kulik V.S., Kazak A.S., Khrabrov Yu.I. Optimization of operation modes of the main gas transportation systems for performance changes. *Pipeline Transport (Theory and Practice)*, 2015, no. 5 (51), pp. 38–42. In Rus.
 18. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Pavlova Z.Kh. *Obespechenie bespereboynoy rabotychastotno-reguliruemyykh elektropriivodov magistralnykh nasosov i tekhnologicheskogo rezhima perekachki pri kratkovremennykh narusheniyakh elektroobzheniya* [Maintenance of uninterrupted operation of frequency-regulated electric drives of main pumps and technological mode of pumping during short-term power supply disruptions]. Ufa, Neftgazovoe delo Publ., 2012. 171 p.
 19. Korshak A.A., Nechval A.M. *Truboprovodny transport nefti, nefteproduktov i gaza* [Pipeline transport of oil, petroleum products and gas]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 2011. 571 p.
 20. Makhutov N.A., Permyakov V.N. *Resurs bezopasnoy ekspluatatsii sudov i truboprovodov* [Resource of safe operation of vessels and pipelines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 516 p.
 21. Feodosev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 544 p.
 22. SP 36.13330.2012. *Magistralnye truboprovody* [Trunk pipelines]. Moscow, 2012. 78 p.

Received: 24 October 2017.

Information about the authors

Zukhra Kh. Pavlova, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Khasan A. Azmetov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr. Sc., head of the department, Ufa State Petroleum Technological University.

Anastasia D. Pavlova, graduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.31

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ВИБРОАКТИВНОСТЬ СИНХРОННОГО ТУРБОДВИГАТЕЛЯ

Полищук Владимир Иосифович¹,
polischuk_vi@mail.ru

Герасимов Николай Владимирович²,
nvgerasimov@yandex.ru

Крицкий Михаил Викторович²,
nurochka18@yandex.ru

Глазырин Александр Савельевич³,
asglazyrin@tpu.ru

¹ Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

² ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС»,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Полевая, 5.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Мощные высоковольтные синхронные электродвигатели с неявнополюсным ротором серии СТД и СТДП являются одними из главных элементов системы сбора нефти и поддержания пластового давления, к которым предъявляются повышенные требования по эксплуатационной надежности. Вибросостояние при этом выступает одним из ключевых параметров, контролируемых в процессе эксплуатации. Источники вибрации имеют как механическую, так и электрическую природу возникновения. Общепринято считать, что замыкание малого количества витков в обмотке возбуждения приводит к незначительному изменению симметрии магнитного тяжения, и из-за того, что витковое замыкание может носить слабовыраженный (перемежающийся) характер, существуя в машине длительное время, оно не оказывает критического влияния на режим работы машины. Проверка на данный вид повреждений выполняется, как правило, только при проведении капитального ремонта двигателя. При эксплуатации двигателя возникает ряд дополнительных побочных негативных явлений, вызываемых витковыми замыканиями в обмотке возбуждения, например, таких как повышенный износ подшипников и резкое снижение ресурса масла из-за возникающих поперечных паразитных токов. В статье анализируется степень влияния электрического повреждения на виброактивность синхронных турбодвигателей.

Цель: оценить степень влияния электрического повреждения в обмотке возбуждения синхронного турбодвигателя на его виброактивность.

Методы. Для оценки степени влияния электрического повреждения в обмотке возбуждения синхронного турбодвигателя использовались расчетные методы, принятые в теории электрических машин.

Результаты. Установлено, что витковые замыкания в обмотке ротора вызывают изменение уровня вибрации не столько вследствие изменения магнитного тяжения, сколько из-за неравномерности нагрева бочки ротора. На изменение виброактивности влияет даже незначительная разница температур. Рекомендовано при изменении виброактивности синхронного турбодвигателя проводить тщательную проверку машины на предмет возникновения электрического повреждения в обмотке возбуждения.

Ключевые слова:

Синхронный турбодвигатель, витковое замыкание, вибрация, обмотка возбуждения, техническое состояние.

Введение

Синхронные турбодвигатели широко используются в нефтегазовой отрасли в качестве мощных ответственных электроприводов компрессоров, газовых нагнетателей, воздуходувок, насосов сбора нефти и поддержания пластового давления, к таким электроприводам предъявляются высокие требования по эксплуатационной надежности [1]. Требования эксплуатации синхронных двигателей (СД) определяют необходимость обязательного контроля их технического состояния с целью предотвращения ненормальных режимов и повреждений [2, 3]. Особое место занимает контроль вибрационного состояния ротора синхронных машин,

что вызвано разрушительными последствиями повышенной вибрации на машину. Применяемые в типовых схемах КНС (БКНС) синхронные турбодвигатели трехфазного тока частотой 50 Гц типа СТДП-6300–2-У4, СТДП-8000–2-У4, СТДП-10000–2-У4, СТДП-12500–2-У4 имеют частоту вращения 3000 об/мин, десятки мегаватт мощности и тем не менее системы диагностики от электрических повреждений в обмотке ротора, влияющих на его виброактивность, для них не разрабатываются. В настоящее время такие исследования ведутся в основном для крупных турбогенераторов [4–11]. Это связано с установившимся мнением, что у синхронных машин мощностью менее

100 МВт витковое замыкание (ВЗ) малого количества витков обмотки ротора не может вызвать сильного нарушения симметрии магнитного тяжения и существенно повлиять на виброактивность машины [12].

В то же время в условиях эксплуатации, при возникновении электрических дефектов, влияющих на виброактивность, например виткового замыкания (ВЗ) в обмотке возбуждения СД, крайне сложно эффективно снизить уровень вибрации [13].

Поскольку первопричины возникающей вибрации могут быть как механические, так и электрические, потребуются различные стратегии снижения уровня вибрации до нормативных значений [2, 13].

Наиболее изучены механические электромагнитные причины возникновения вибрации СД и методы ее устранения [14–16]. Существующие способы улучшения вибрационного состояния в основном связаны с балансировкой вращающейся части электрической машины.

Постановка задачи

Необходимо проанализировать, какими факторами, помимо нарушения магнитного тяжения, ВЗ влияет на изменение виброактивности СД.

Влияние на вибрацию неравномерности нагрева бочки ротора током возбуждения

Очевидно, что на уровень вибрации СД при ВЗ в обмотке ротора должен существенно повлиять прогиб ротора вследствие возникновения теплового дисбаланса бочки ротора. Источников теплового дисбаланса из-за ВЗ в обмотке ротора несколько. В первую очередь причиной возникновения теплового дисбаланса бочки ротора является неодинаковое количество тепла, выделяющееся в обмотках полюсов, имеющих разное количество витков [17, 18]. Разницу между количеством выделившегося тепла в целом и поврежденном полюсе двухполюсной машины можно довольно точно определить по формуле на основе закона Джоуля-Ленца:

$$\Delta Q = \frac{w_k}{w} \cdot I_f^2 \cdot R \cdot t,$$

где w – общее количество витков в обмотке ротора; w_k – количество замкнутых витков; I_f – ток возбуждения ротора, А; R – сопротивление обмотки возбуждения, Ом; t – время, с.

Так как оба полюса находятся в одинаковых условиях охлаждения, неравномерное выделение тепла в полюсах приводит к разности температур между обмотками полюсов и к прогибу бочки ротора.

Величина прогиба в случае, когда точки с различным нагревом расположены на противоположных частях бочки ротора, изготавливаемой из высоколегированной стали марок: ОХНЗМ, ОХН4МАР, 35ХНЗМА, 35ХН1МФА, 35ХНМ, 36ХНМА, 36ХНЗМФА, 36ХН1Н, приближенно может быть подсчитана по формуле:

$$\lambda = \frac{(t_2 - t_1) \cdot \alpha \cdot l^2}{8d},$$

где $t_2 - t_1$ – разность температур, °С; l – длина ротора, м; d – диаметр вала, м; $\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент линейного удлинения для стали 35ХНМ, град⁻¹ [19].

Например, для турбодвигателя типа СТДП-8000–2-У4 при разности температур в диаметрально противоположных точках поверхности бочки ротора 1 °С деформация будет равна:

$$\lambda = \frac{11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5^2}{8 \cdot 0,48} = 0,0000372 \text{ м.}$$

Если считать, что среднее перемещение всей массы ротора составляет 0,5λ, при массе ротора 4,52 т возникает неуравновешенность, приведенная к окружности бочки ротора ($R=0,24$ м), равная:

$$\Delta M = \frac{0,0000372 \cdot 4520}{2 \cdot 0,24} = 0,3503 \text{ кг.}$$

При номинальной скорости вращения $N=3000$ об/мин величина центробежной силы $F_{\text{цн}}$ в данном случае достигает величины:

$$F_{\text{oi}} = \frac{(\pi \cdot N / 30)^2 \cdot R \cdot \Delta M}{g} = \frac{(3,14 \cdot 3000 / 30)^2 \cdot 0,24 \cdot 0,3503}{9,81} = 845,8 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Для данного типа машин достижение неуравновешенной центробежной силой значения 30 % веса ротора является предельно допустимой величиной, за которой может последовать разрушение машины. В нашем случае величина $F_{\text{цн}}$ составила 18,7 %, что более чем существенно. Из этого следует, что разность температур (2...3 °С) в диаметрально противоположных точках поверхности бочки ротора может вызвать вибрацию, значительно превышающую 50 мкм, нормированное ГОСТ 20815 и ПТЭ ЭП значение [20]. Необходимо учитывать, что изменение вибрации будет носить режимный характер, вследствие зависимости от тока возбуждения и из-за тепловой инерции бочки ротора. Само ее изменение будет происходить не сразу после изменения тока возбуждения, а постепенно, следуя за изменением теплового состояния бочки ротора.

Влияние на тепловую деформацию ротора искажения распределения индукции под полюсами

Для облегчения анализа возникающих процессов было принято, что в закороченных витках одновременно протекают два тока: ток возбуждения СД и встречный ток такой же величины.

Индукция в зазоре при этом будет определяться:

- нормальной составляющей, обуславливаемой всей обмоткой возбуждения и протекающим по ней током, которую с достаточной для практи-

ки точно можно принять синусоидальной (кривая 1, рис. 1, а);

- составляющей от протекания в замкнутых витках встречного тока (кривая 2, рис. 1, а).

Составляющая от встречного тока кривая 2 (рис. 1, б) является несинусоидальной пространственной кривой, которую можно разложить на синусоидальные гармонические составляющие. Главными составляющими будут являться гармоники основной – кривая 3 (рис. 1, б) и двойной – кривая 4 (рис. 1, б) частоты. Гармоника двойной частоты оказывает основное влияние на рассматриваемые тепловые процессы.

Гармоническая составляющая двойной частоты, вращаясь в пространстве со скоростью вращения основного поля статора, будет индуцировать в обмотках статора ЭДС с частотой $f_2 = 2f_0$ (где f_0 – номинальная частота СД). Чередуемость фаз этой ЭДС будет обратным чередованием фаз ЭДС, индуцированной основным полем, поскольку для основной гармоники сдвиг между фазами A_1 и B_1 составляет 120° , между фазами A_1 и C_1 – 240° ; для второй гармоники сдвиг между фазами A_2 и B_2 равен $120^\circ \cdot 2 = 240^\circ$, между фазами A_2 и C_2 – $240^\circ \cdot 2 = 480^\circ$, что соответствует $480^\circ - 360^\circ = 120^\circ$, то есть фазы B_2 и

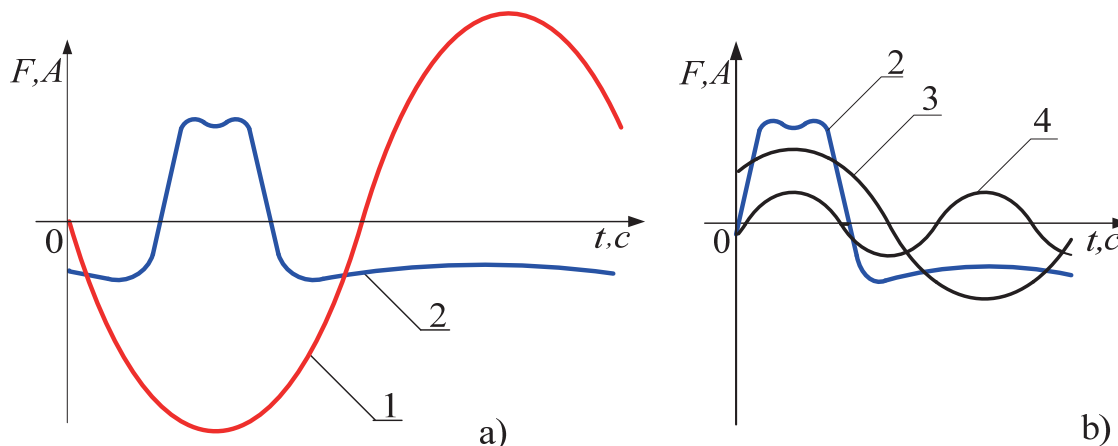


Рис. 1. График МДС обмотки возбуждения с замкнутым витком (а) и спектральный анализ МДС от обратного тока (б): 1 – кривая МДС от прямого тока; 2 – кривая МДС от обратного тока; 3 – основная гармоническая; 4 – удвоенная гармоническая

Fig. 1. Graph of magnetic driving force of winding rotor with turn-to-turn short-circuits (a) and inverse ampere frequency analysis (b): 1 is the forward ampere; 2 is the inverse ampere; 3 is the base frequency; 4 is the double frequency

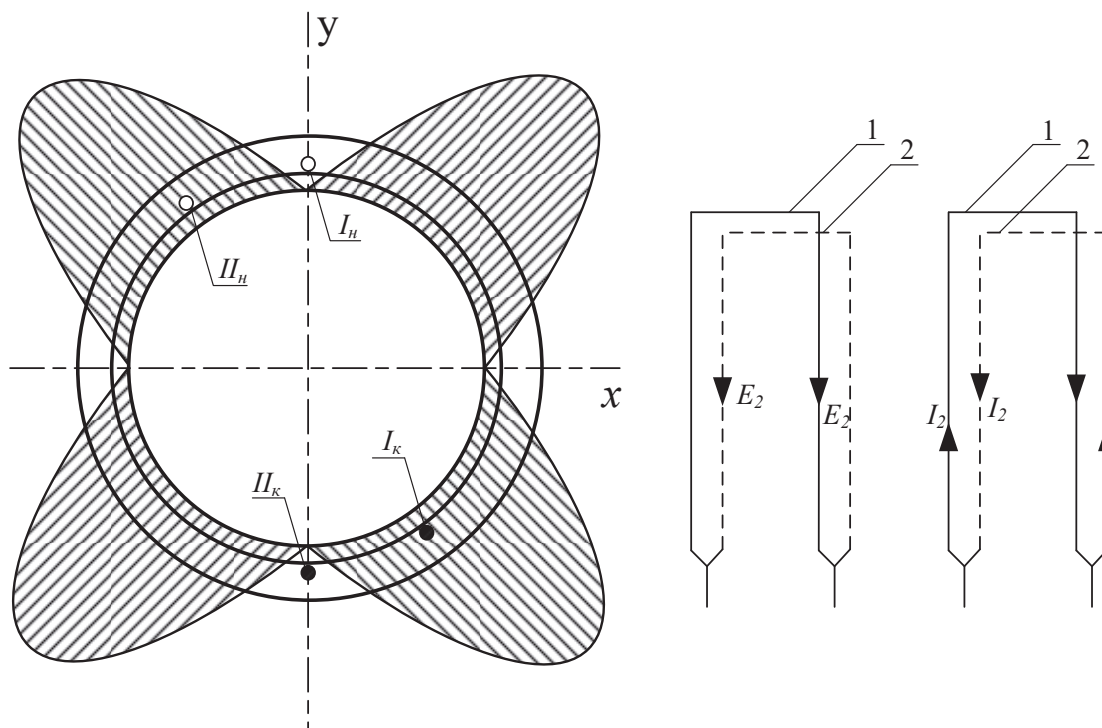


Рис. 2. Схема появления уравнивающих токов в параллельных цепях: 1 – первая ветвь; 2 – вторая ветвь

Fig. 2. Scheme of occurrence of equalising currents in shunt circuits: 1 is the first conductor; 2 is the parallel conductor

C_2 относительно B_1 и C_1 меняются местами, что равносильно изменению чередования фаз на обратное.

Индуктированные ЭДС E_2 в каждом витке имеют противоположные направления, поэтому в параллельных цепях обмоток, имеющих сокращенный шаг и параллельные ветви (рис. 2), возникнут уравнивающие токи с частотой $f_2=2f_0$.

Величина уравнивающих токов будет определяться амплитудой ЭДС второй гармонической и величиной реактивного сопротивления для уравнивающих токов.

Амплитуда ЭДС зависит от несимметрии кривой индукции, создаваемой обратным током, и определяется количеством замкнутых витков, их местоположением относительно большого зуба на роторе и величиной тока возбуждения.

Индуктивные сопротивления x_1 так же, как и сопротивление обратной последовательности x_2 , зависит главным образом от индуктивности рассеяния статора.

Влияние на тепловой дисбаланс ротора уравнивающих токов в параллельных ветвях обмотки статора при ВЗ в обмотке ротора

ВЗ в обмотке ротора вызывает искажение распределения индукции под полюсами. Уравнивающие токи, если они синусоидальны, создают четырехполюсную МДС, вращающуюся против направления чередования фаз уравнивающих токов, то есть по направлению вращения ротора, со скоростью, соответствующей скорости вращения ротора ($f_y=2f_0$ и $p_y=2p=4$, где p – число пар полюсов генератора, p_y – число пар полюсов для МДС). Особенно этой МДС является то, что при ее вращении происходит изменение, как амплитуд полуволн, так и их полюсных делений. Кривую МДС можно разложить на следующие составляющие: основную гармонику с частотой $f=f_y$ и пульсирующие гармоники с частотой f_y (вторую, третью и т. д.).

Пульсирующие гармоники можно заменить двумя синусоидальными составляющими с половинной амплитудой, которые вращаются относительно основной гармоники в разные стороны со скоростями, соответствующими

$$n_v = \pm \frac{n_o}{v},$$

где n_y – скорость вращения основной гармоники; v – порядок гармоники (знак «+» соответствует прямому полю, знак «-» соответствует обратному полю).

Таким образом, для второй гармоники скорости вращения (для $n=3000$ об/мин) будут:

- для прямого поля

$$n'_2 = n + \frac{n}{2} = 3000 + \frac{3000}{2} = 4500 \text{ об / мин};$$

- для обратного поля

$$n''_2 = n - \frac{n}{2} = 3000 - \frac{3000}{2} = 1500 \text{ об / мин}.$$

Относительно вращающегося ротора в обоих случаях будет одинаковая скорость вращения 1500 об/мин, что для второй гармоники четырехполюсного поля соответствует $2p=8$ и частоте индуктированных в роторе токов, равной 100 Гц.

Если уравнивающие токи несинусоидальны, то картина значительно осложнится, но процесс останется аналогичным рассмотренному. Разложения необходимо будет выполнить для каждой гармонической составляющей уравнивающего тока.

Определить потери в роторе, вызываемые уравнивающими токами в параллельных цепях обмотки статора, расчетом невозможно, так как активные и реактивные сопротивления для токов, индуктированных в бочке ротора и других его контурах, представляют собой переменные нелинейные величины, зависящие от частоты и величины индукции вращающегося поля, а также от величины индукции постоянного результирующего магнитного потока машины в стали бочки; эта индукция является также переменной величиной по окружности бочки ротора. Поэтому ограничимся лишь качественным анализом явлений.

Частота переменных магнитных потоков, вызванных наличием короткозамкнутых витков в обмотке ротора, по отношению к последнему велика, поэтому глубина проникновения потока будет небольшой, порядка нескольких миллиметров. Индуктированная в обмотке ротора ЭДС за счет демпфирующего действия массивной бочки и демпферной системы ротора будет при этом незначительной.

Действие МДС, уравнивающих токов на ротор аналогично действию МДС от токов обратного следования фаз, и поэтому все положения о реактивности обратного следования можно распространить и на реактивность уравнивающих токов.

Как известно, индуктивное сопротивление обратной последовательности x_2 может быть выражено уравнением

$$x_2 = x_\delta + x'_s\theta,$$

где x_δ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; x_s – некоторое эквивалентное индуктивное сопротивление ротора.

Короткозамкнутые витки в обмотке ротора можно рассматривать как несимметричную демпферную систему, влияние которой на двух- и четырехполюсные магнитные поля, вращающиеся относительно ротора, показано на рис. 3.

При наложении МДС поля, вращающегося относительно ротора, на весьма значительную МДС, создающую внутренний магнитный поток СД, распределение потерь по окружности бочки ротора изменится.

Наложение МДС в области больших насыщений вызывает значительно меньшие колебания индукции, а значит и меньшие потери, чем в области малых насыщений.

Положение короткозамкнутых витков относительно максимума индукции B_i будет определять их влияние на степень неравномерности нагрева ротора.

На рис. 4 показана векторная диаграмма СД, из которой следует, что степень влияния короткозамкнутых витков зависит от угла между осью полюсов (Φ_0) и осью внутреннего потока генератора (Φ_i), т. е. от угла $\psi - \gamma$.

Влияние на вибрацию ротора виткового замыкания в обмотке возбуждения

Чем ближе расположены короткозамкнутые витки обмотки ротора к поверхности паза, тем больше их влияние на неравномерность нагрева

бочки ротора. Количество короткозамкнутых витков влияет как на величину МДС встречного тока и величины индуктивного и активного сопротивлений короткозамкнутого контура, так и на равномерность нагрева бочки ротора током возбуждения. С увеличением количества короткозамкнутых витков степень нагрева будет увеличиваться.

При наличии относительно небольшого числа замкнутых витков изменение тока возбуждения ненагруженного СД может не вызвать изменения амплитуды вибрации. Такое явление может быть в

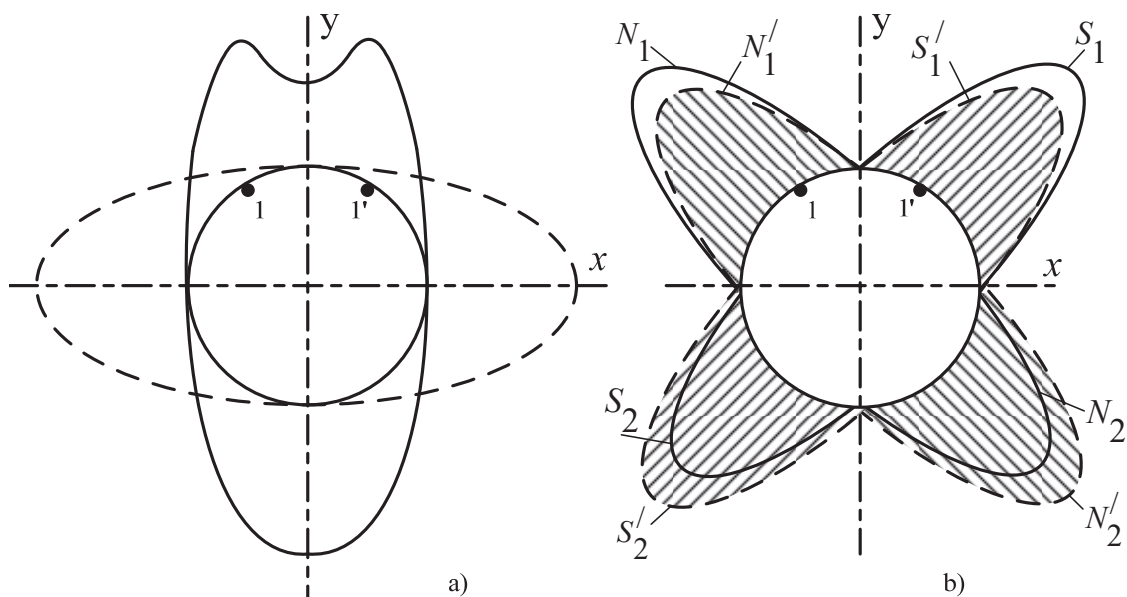


Рис. 3. Схема влияния несимметричной демпферной системы на равномерность магнитных полей: а) двухполюсное поле; б) четырехполюсное поле: 1-1 – замкнутый виток

Fig. 3. Plan of influence of unbalanced damper system on uniformity of magnet fields: a) bipolar field; b) quadripolar field: 1-1 is the turn-to-turn short-circuits

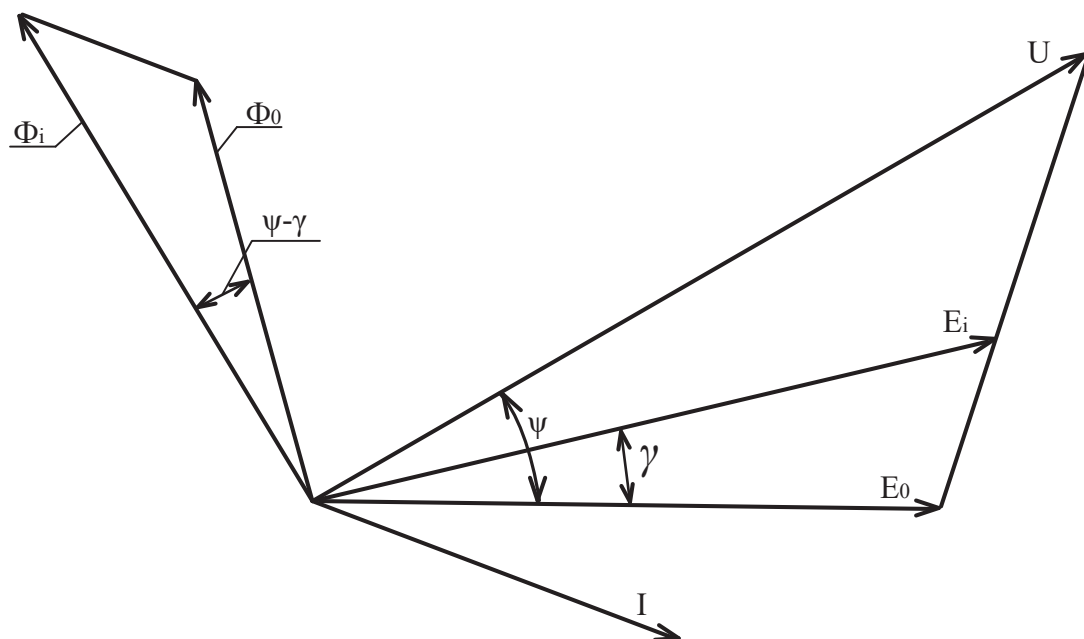


Рис. 4. Векторная диаграмма синхронного двигателя

Fig. 4. Vectogram of synchronous motor

том случае, когда силы одностороннего тяжения между ротором и статором СД вызывают меньшее изменение вибрации агрегата, чем чувствительность и точность применяемого виброизмерительного прибора, а также если вектора равнодействующих сил первоначальной неуравновешенности P_i (рис. 5, а), соответствующей режиму без нагрузки на валу, и одностороннего магнитного тяжения между ротором и статором СД P_σ расположены под углом, близким к 120° и не сильно отличаются друг от друга по величине. В последнем случае равнодействующая $P_{\Sigma xx}$ векторов сил P_i и P_σ будет приблизительно равна P_i , что не вызовет изменения амплитуды вибрации, однако при этом изменится фаза вибрации на угол, близкий к 60° .

При изменении тока возбуждения СД до тока полной нагрузки величина вектора силы P_σ увеличится на 10...15 % вместе с ростом возбуждения СД за счет увеличения индукции при росте потока Φ_i (предполагается, что напряжение на зажимах СД неизменно) и равнодействующая векторов сил P_i и P_σ будет близка к $P_{\Sigma xx}$. Поэтому при сравнительно быстрых изменениях тока возбуждения вибрация агрегата изменяться не будет. Под воздействием причин, изложенных ранее, начнется неравномерный нагрев бочки ротора, вызывающий её деформацию. Направление вектора центробежной силы P_i , обусловленной прогибом бочки ротора, будет совпадать с вектором P_σ . При установившемся нагреве бочки ротора равнодействующая сила $P_{\Sigma p}$ изменится относительно $P_{\Sigma xx}$ как по величине, так и по фазе (рис. 5, а). При этом изменение вектора силы, зависящей от тока возбуждения ($P_i + P_\sigma$), будет всегда неизменно по фазе.

Если при неизменном токе ротора, установившийся вибрационный режим которого показан на рис. 5, а, произвести изменение активной нагрузки, то между осью полюсов и магнитным потоком СД возникает угол $\psi - \gamma$, где ψ – угол между осью полюсов и вектором напряжения статора; γ – угол между вектором внутренней ЭДС СД E_i и вектором напряжения статора. Учитывая, что вектора P_i и P_σ повернутся вместе с ротором на угол ψ , векторная диаграмма сил, действующих на ротор, примет вид, показанный на рис. 5, б. При этом произойдет увеличение вектора P_i за счет повышения неравномерности нагрева. Суммарный вектор $P_i + P_\sigma$ увеличится и незначительно изменится по фазе на угол, меньший чем $\psi - \gamma$. Если $P_i > P_\sigma$, то с достаточной для практики точностью можно считать, что с изменением активной нагрузки в результате прогрева ротора будет изменяться величина вибрации, но не её фаза. Таким образом, наиболее характерным признаком влияния виткового замыкания на вибрацию агрегата можно считать практическую неизменность фазы усилий, действующих на ротор при изменениях активной и реактивной нагрузок.

Для СД, не имеющих параллельных цепей в обмотке статора, изложенные явления будут выражены значительно слабее, чем при наличии параллельных ветвей, так как отсутствие уравнивающих токов в обмотке статора уменьшает неравномерность нагрева ротора. Кроме того, относительно меньшая длина ротора (меньшая мощность машин без параллельных цепей в обмотке статора) вызовет также меньший прогиб ротора от неравномерного нагрева бочки ротора по окружности.

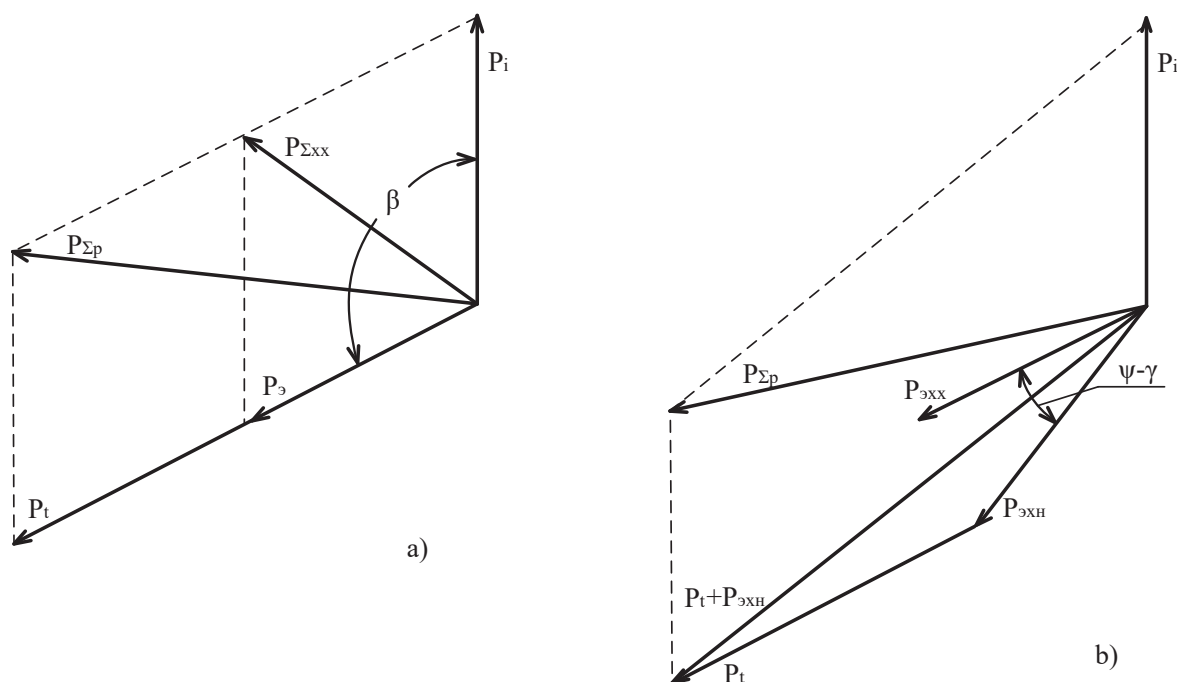


Рис. 5. Векторная диаграмма сил: а) без нагрузки; б) при нагрузке

Fig. 5. Vectogram of forces: a) without loading; b) with loading

Появление дисбаланса за счет изменения геометрии ротора во время технологического процесса вследствие неравномерности нагрева ротора является не одномоментной неуравновешенностью, которую можно устранить при помощи балансировки ротора. Такой дисбаланс требует иного технического решения по снижению величины вибрации. Необходимо иметь систему диагностики, позволяющую идентифицировать источник вибрации и устранять первопричину, то есть восстанавливать межвитковую изоляцию обмотки ротора.

Выводы

1. Установлено, что витковые замыкания в обмотке ротора вызывают изменение уровня вибрации не столько вследствие изменения магнитного тяжения, сколько из-за неравномерности нагрева бочки ротора.
2. Неравномерность нагрева бочки ротора, вызванная витковым замыканием в обмотке ротора синхронного двигателя, вносит существен-

ное изменение уровня вибрации. Изменение вибрации носит режимный характер вследствие зависимости от тока возбуждения и из-за тепловой инерции бочки ротора.

3. Для синхронных турбодвигателей, имеющих параллельные ветви в обмотке статора, несимметрия нагрева значительно сильнее, чем без параллельных ветвей, поскольку отсутствие уравнивающих токов в обмотке статора уменьшает неравномерность нагрева ротора.
4. При изменении виброактивности синхронного турбодвигателя требуется тщательная проверка машины на предмет возникновения электрического повреждения в обмотке возбуждения, поскольку влияние виткового замыкания в обмотке возбуждения на изменение геометрии ротора при неравномерном нагреве его бочки является не одномоментной неуравновешенностью, которую можно устранить при помощи однократной балансировки ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, С.Н. Великий, М.С. Ершов, А.Д. Яризов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 478 с.
2. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system / V.V. Sushkov, M.K. Veliev, V.V. Timoshkin, T.D. Gladkih // Oil Industry. – 2017. – V. 2. – P. 82–84.
3. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
4. Roytgarts M. Method of Shorted Turn Monitoring in the Turbo-generator Rotor Winding // Int. Conf. on Electric Power Systems. – Spain, Tenerife, 2005. – P. 468–473.
5. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray field magnetic sensor for turbogenerator diagnostics // Journal of Siberian Federal University. – 2015. – V. 8 (2). – P. 201–207.
6. Полищук В.И., Хамухин А.А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет анализа магнитных потоков рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 82–93.
7. Способ раннего обнаружения витковых замыканий и диагностирования технического состояния обмотки ротора турбогенератора с определением тока ротора по параметрам статора: пат. Рос. Федерация № 2472168; заявл. 15.03.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.
8. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings // J. Electromagnetic Analysis & Applications. – 2009. – V. 3. – P. 187–191.
9. Hamid Yaghoobi, Habib Rajabi Mashhadi, Kourosh Ansari. Artificial neural network approach for locating internal faults in salient-pole synchronous generator // Expert Systems with Applications. – 2011. – V. 38. – P. 13328–13341.
10. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short Circuit of Rotor Windings of Turbo-Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method / Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou // Journal of Power Electronics. – 2011. – V. 11. – № 3. – P. 759–766.
11. Polishchuk V.I., Sergeev V.L., Kalayda V.T. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty // XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016). – Moscow, Russia, May 12–14, 2016. – P. 238–244.
12. Глебов И.Я., Данилевский Я.Б. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1989. – 119 с.
13. Ковалев В.К. Факторы влияния на вибрацию газоперекачивающих агрегатов с синхронными приводами // Газовая промышленность. – 2015. – № 3 (719). – С. 101–104.
14. Influence of Unbalanced Magnetic Pull on Free Vibration Characteristics of Motor Rotor Based on Multi-Scale Method / F. Liu, H. Liu, C. Xiang, Y. Wu, Z. Zhan // Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – № 53 (16). – P. 52–60.
15. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations / M. Cuevas, R. Romary, J.-P. Lecoine, T. Jacq // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – № 52 (7). – P. 632–638.
16. Vibration study and classification of rotor faults in PM synchronous motor / Y. Yu, C. Bi, Q. Jiang, N.L.H. Aung, A.A. Mamun // Microsystem Technologies. – 2014. – № 20 (8–9). – P. 1653–1659.
17. Ахмедшина М.В., Прусс В.В. Поход к учету вибрационных параметров асинхронных двигателей при изменении состояния конструктивных элементов // Вестник КГУ им М. Остроградского. – 2010. – № 4 (63). – Ч. 3. – С. 77–83.
18. Accurate rotor fault detection in doubly-fed Wound-Rotor Induction Machine / Y. Gritli, A. Tani, C. Rossi, D. Casadei, F. Filippetti // Electric International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017. – Santa Margherita Ligure (GE), Italy, 2017. – P. 756–760.
19. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
20. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Виды и причины вибрации электрических машин // Научные технологии. – 2015. – № 5. – С. 32–36.

Поступила 15.09.2017 г.

Информация об авторах

Полищук В.И., доктор технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Самарского государственного технического университета.

Герасимов Н.В., старший диспетчер ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС».

Крицкий М.В., диспетчер ОДС Самарского РДУ АО «СО ЕЭС».

Глазырин А.С., доктор технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.31

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL DAMAGE IN FIELD MAGNETIZING COIL ON SYNCHRONOUS ROUND-ROTOR MOTOR VIBRATION

Vladimir I. Polishchuk¹,

polischuk_vi@mail.ru

Nikolay V. Gerasimov²,

nvgerasimov@yandex.ru.

Mikhail V. Kritsky²,

nurochka18@yandex.ru.

Alexander S. Glazyrin³,

asglazyrin@tpu.ru

¹ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

² Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS»,
5, Polevaya street, Samara, 443100, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Powerful high-voltage synchronous motors with STD and STDP round rotor series are the main elements of oil gathering system and maintaining reservoir pressure. This fact increases the operational reliability demands. Vibration condition is one of the key parameters controlled in operation. The vibration sources are mechanical and electrical. Generally, a small number of field-turns in the field magnetizing coil leads to a slight change in the symmetry of a magnetic pull. Because of the fact that a short circuit can have the intermittency of stimulation and exist in the motor for a long period of time without exerting marginal impact on operating mode, such damages are checked only at engine overhaul. Thus it is necessary to consider a number of negative effects caused by short circuits in the field magnetizing coil, such as increased wear of the bearings and a sharp decline in bearing lube oil resource due to transverse parasitic currents. The article analyzes the degree of influence of electrical damage on vibration condition of synchronous round-rotor motor.

The aim of the research is to assess the degree of influence of electrical damage in a field magnetizing coil of a synchronous round-rotor motor on vibration condition of the latter.

Methods. The authors have used the calculation methods adopted in the theory of electrical machines to assess the influence of electrical damages in the field magnetizing coil of the synchronous round-rotor motor.

Results. It was found that the turn-to-turn short-circuit in the rotor winding leads to vibration level changes not so much because of the magnetic pull changes as due to the uneven heating of the rotor body. The vibration state change is affected by a slight temperature difference. In case of a vibrostatus changes, it is required to check the electrical machine for electric damage occurrence in a drive winding.

Key words:

Synchronous round-rotor motor, turn-to-turn short-circuit, vibration, field magnetizing coil, diagnostics.

REFERENCES

1. Belousenko I.V., Shvarts G.R., Velikiy S.N., Ershov M.S., Yari-zov A.D. *Novye tehnologii i sovremennoe oborudovanie v elektro-energetike neftegazovoy promyshlennosti* [New technologies and modern equipment in electrical power plants of oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 2007. 478 p.
2. Sushkov V.V., Veliev M.K., Timoshkin V.V., Gladkih T.D. Optimum control for multiple computer complex of oil field formation pressure maintenance system. *Oil Industry*, 2017, vol. 2, pp. 82–84.
3. Alekseev B.A. *Opredelenie sostoyaniy (diagnostika) krupnykh turbogeneratorov* [Determination states (diagnosis) of large turbogenerators]. Moscow, NC ENAS Publ., 2001. 152 p.
4. Roytgarts M. Method of Shorted Turn Monitoring in the Turbogenerator Rotor Winding. *Int. Conf. on Electric Power Systems*. Spain, Tenerife, 2005. pp. 468–473.
5. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray field magnetic sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian Federal University*, 2015, no. 8 (2), pp. 201–207.
6. Polishchuk V.I., Khamukhin A.A. The impact of turn to turn short circuits of synchronous generator rotor winding based on wavelet analysis of leakage flux. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 82–93. In Rus.
7. Belov V.S., Glezerov S.N., Parkhomenko Yu.S. *Sposob rannego obnaruzheniya vitkovkoy zamykaniy i diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya obmotki rotora turbogeneratorsa s opredeleniem toka rotora po parametram statora* [Method of turn-to-turn short circuits early detection and diagnosis of the turbogenerator rotor winding technical condition with definition of rotor current using stator parameters]. Patent RF, no. 2472168, 2011.
8. Ma H.Z., Pu L. Fault Diagnosis Based on ANN for Turn-to-Turn Short Circuit of Synchronous Generator Rotor Windings. *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009, vol. 3, pp. 187–191.
9. Hamid Yaghobi, Habib Rajabi Mashhadi, Kourosh Ansari. Artificial neural network approach for locating internal faults in salient-pole synchronous generator. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, pp. 13328–13341.
10. Ligio Wang, Yi Wang, Dianguo Xu, Bo Fang, Qinghe Liu, Jing Zou. Application of HHT for Online Detection of Inter-Area Short

- Circuit of Rotor Windings of Turbo-Generators Based on the Thermodynamics Modeling Method. *Journal of Power Electronics*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 759–766.
11. Polishchuk V.I., Sergeev V.L., Kalayda V.T. Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty. *XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016)*. Moscow, Russia, May 12–14, 2016. pp. 238–244.
 12. Glebov I.Ya., Danilevsky Ya.B. *Diagnostika turbogeneratorov* [Diagnosis of turbogenerators]. Leningrad, Nauka Publ., 1989. 119 p.
 13. Kovalev V.K. Factors changing vibration of assemblies of swapping of gas with synchronous drives. *Gas Industry Magazine*, 2015, no. 3 (719), pp. 101–104. In Rus.
 14. Liu F., Liu H., Xiang C., Wu Y., Zhan Z. Influence of Unbalanced Magnetic Pull on Free Vibration Characteristics of Motor Rotor Based on Multi-Scale Method. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 53 (16), pp. 52–60.
 15. Cuevas M., Romary R., Lecointe J.-P., Jacq T. Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, no. 52 (7), pp. 632–638.
 16. Yu Y., Bi C., Jiang Q., Aung N.L.H., Mamun A.A. Vibration study and classification of rotor faults in PM synchronous motor. *Microsystem Technologies*, 2014, no. 20 (8–9), pp. 1653–1659.
 17. Akhmetshina M.V., Pruss V.V. Forecasting vibration parameters of asynchronous motor with provision for changes condition structural elements. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, no. 4 (63), P. 3, pp. 77–83. In Rus.
 18. Gritli Y., Tani A., Rossi C., Casadei D., Filippetti F. Accurate rotor fault detection in doubly-fed Wound-Rotor Induction Machine. *Electric International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017*. Santa Margherita Ligure (GE), Italy, 2017. pp. 756–760.
 19. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Directory on electrotechnical materials]. Ed. by Yu.V. Koritsky. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 464 p.
 20. Mindrin V.I., Pachurin G.V., Rebrushkin M.N. Types and causes of vibration power machines. *Modern high technologies*, 2015, no. 5, pp. 32–36. In Rus.

Received: 15 September 2017.

Information about the authors

Vladimir I. Polishchuk, Dr. Sc., associate professor, Samara State Technical University.

Nikolay V. Gerasimov, power system senior manager of the dispatch service, Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS».

Mikhail V. Kritsky, power system manager of the dispatch service, Regional dispatching office of the Samara Area, «SO UPS».

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК:662.276:550.8.052

ОТКРЫТАЯ ТРЕЩИНОВАТОСТЬ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ РАЗРАБОТКИ

Белозёров Владимир Борисович,
belozerovvb@hw.tpu.ru

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

Актуальность. Разработка горючих сланцев как перспективного источника углеводородного сырья актуальна и своевременна для районов с тенденцией снижения добычи нефти и развитой инфраструктурой обустройства. В полной мере это относится к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, где перспективы «сланцевой нефти» связывают с битуминозными аргиллитами баженовской свиты, промышленная продуктивность которой доказана на целом ряде площадей.

Цель исследования: оценить роль планетарной трещиноватости в отложениях битуминозных аргиллитов баженовской свиты с целью повышения эффективности разработки «сланцевой» нефти и выявить условия автогенерации планетарной трещиноватости по результатам анализа ориентированной открытой трещиноватости и испытания баженовской свиты.

Объект исследования: юрско-меловые битуминозные сланцы баженовской свиты юго-восточной части Западно-Сибирской плиты.

Методика исследования основана на сопоставлении теоретических положений планетарной трещиноватости с конкретными исследованиями по трещиноватости отложений баженовской свиты, результатах её опробования в скважине Глуховская № 2 и особенностями разработки сланцевой толщи Баккен и Барнет в Северной Америке.

Результаты. В процессе проведённого анализа на основе опубликованных источников и данных кернового материала показано широкое развитие вертикальных трещин отрыва в разрезе баженовской свиты. Отмечается возрастная связь выделяемых систем трещин с отпечатками глобального ротационного поля напряжений для территории Евразии. Выявлена тождественная динамика притока нефти при испытании баженовской свиты с использованием порохового генератора давления в скважине № 2 Глуховской площади и при гидроразрыве сланцевой толщи в скважине USA 42–24A на площади Баккен (Северная Америка).

Ключевые слова:

Баженовская свита, трещиноватость, гидроразрыв, поровое давление, сланцевая толща, поле напряжений.

Введение

Практика показывает, что оценка эффективности разработки сланцевых толщ во многом зависит от двух факторов:

1. Правильной оценки качества «коллектора», характеризующей литологическую неоднородность рассматриваемых отложений на основе треугольной диаграммы, построенной по данным кернового материала и ГИС [1].
2. Оценка качества проводки скважины, что предусматривает выбор оптимального дизайна горизонтальной скважины, последующего гидроразрыва пласта и дальнейшего режима её эксплуатации в соответствии с особенностями распределения литотипов сланцевой толщи в разрезе [1, 2–4].

Рассматриваемые факторы позволяют выбрать наиболее оптимальные литолого-технологические критерии для формирования трещин в сланцевой толще, что и обеспечивает высокий уровень начальных дебитов нефти в скважинах и относительно продолжительный период их работы.

Методика исследований

Наиболее дискуссионным моментом в разработке сланцевых толщ является вопрос формирования зон трещиноватости образованных в процессе бурения горизонтальных скважин и проведения гидроразрыва пласта. В основу теоретических моделей положен принцип геомеханики, объясняющий образование трещин как результат механического воздействия на породу, находящуюся в на-

пряжённом состоянии. Проведённые многостадийные гидроразрывы в пределах этих пластов формируют систему техногенных трещин, позволяющую дренировать углеводороды из битуминозных глин. Процесс перехода углеводородов из микропорового пространства сланцевой толщи в трещину контролируется существующими различиями между аномально высоким поровым давлением в породе и давлением на забое скважины. При этом в микропорах формируется свободное пустотное пространство. В условиях низкопроницаемой среды этот процесс быстро затухает. Ограниченный объём техногенных трещин и кратковременный эффекта миграции углеводородов предполагает быстрое снижение производительности скважины, что противоречит наблюдаемой динамике их добычи на разрабатываемых месторождениях [5]. Связывая генезис формирования трещиноватых зон в сланцевой толще не только с процессом её деструкции при механическом воздействии, но и с теоретическими вопросами трещиноватости горных пород, интересно рассмотреть положения общей (планетарной) трещиноватости.

Общие (планетарные) трещины обладают следующими особенностями [6]:

1. Трещины развиты как в дислоцированных, так и в горизонтально залегающих породах на платформах и в складчатых областях.
2. В каждой точке земной поверхности трещины образуют две взаимно перпендикулярные системы, ориентировка которых меняется как по площади, так и в разрезе.

3. Системы планетарных трещин прослеживаются в осадочном чехле платформ от докембрия до третичных отложений.
4. Общие трещины не приурочены к каким-либо тектоническим структурам.
5. Трещины лучше выражены в плотных породах, в которых они перпендикулярны слоистости. Трещины, как правило, не выходят за пределы одного слоя.
6. Наблюдается отчётливая зависимость густоты трещин от толщины «разбитых» ими слоёв.

Ортогональную систему планетарной трещиноватости С.С. Шульц связывает с трендами напряжённости горных пород, возникшими под действием ротационного поля вращения Земли [7]. В условиях дрейфа литосферных плит в пределах различных континентов и стратиграфических горизонтов эта система трещин имеет разную пространственную ориентировку.

Анализ трещиноватости баженовской свиты

Возможность развития процесса планетарной трещиноватости в отложениях баженовской свиты юго-восточной части Западно-Сибирской плиты можно оценить по результатам изучения трещин в керне скважин.

Наиболее масштабное изучение трещин на рассматриваемой территории проводилось в 60–70-х гг. прошлого столетия сотрудниками Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) [8].

При общем изучении разрывных нарушений в осадочном разрезе ими был проведён анализ трещиноватости баженовской и георгиевской свит на 111 структурах, расположенных в пределах обширной территории юго-восточной части Западно-Сибирской плиты.

По результатам обобщения полученного материала можно сделать следующие выводы:

1. Из 111 проанализированных локальных поднятий трещиноватость пород баженовской и георгиевской свит зафиксирована на 88, что составляет 80 % от выборки.
2. Из всего объёма анализируемых трещин трещины растяжения составляют 95 %. В незначительном количестве присутствуют тектонические трещины сжатия со следами скольжения и ещё менее значимы другие типы трещин.
3. Из выделенных трещин свободно открытые трещины растяжения составляют 55 %, а открытые трещины растяжения, выполненные минеральными образованиями, – 45 %.
4. Анализ распределения углов падения трещин показывает, что 80 % свободно открытых трещин растяжений имеют вертикальную ориентировку и 18 % – близкую к ней (80–90°). Аналогичную ориентировку имеют 20 % трещин растяжения, выполненных минеральными образованиями. Для остальных минерализованных трещин отмечается их равномерная ориентировка в диапазоне углов падения 20–60°. Раз-

ная ориентировка углов падения свободно открытых и минерализованных трещин может свидетельствовать о различном генезисе их формирования.

5. Плотность трещиноватости, оцененная по 38 структурам и отражающая отношение числа трещин к размеру поднятой керновой колонки в метрах, изменяется от 1,5 до 0,25 трещ./м.

Как следует из вышеизложенного, вертикальные свободно открытые трещины растяжения в отложениях баженовской и георгиевской свит получили широкое развитие в пределах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты (пункт 1–3). Отмечается неравномерность их проявления по разрезу (пункт 5), что свидетельствует о различных территориальных перспективах разработки рассматриваемых отложений. Неоднородность продуктивности аналогичных сланцевых толщ отмечаются и при их промышленной эксплуатации [1]. Так, накопленная добыча нефти на сланцевом месторождении Баккен по различным скважинам за первые 90 дней устойчивой добычи изменяется от 10000 до 80000 баррелей.

Пространственное направление трещин баженовской свиты можно рассмотреть по данным палеомагнитной ориентировки керна на Катильгинской и Кулеевской площадях (рис. 1, В), расположенных в пределах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты.

На рассматриваемых структурах в составе баженовской свиты выделяются прослои с вертикальными трещинами отрыва и скола. Ортогональная система трещин отрыва развита по битуминозным аргиллитам в скважине 105 Катильгинской площади, где плоскости трещин имеет изогнутую, непрямолинейную форму. Формируются эти трещины перпендикулярно направлению растягивающих напряжений. Трещина скола проявляется по карбонатному слою в скважине 1 Кулеевской площади. Трещина характеризуется ровной, прямолинейной поверхностью.

Теоретически трещины скола формируются под углом 45° к сжимающим и растягивающим напряжениям. Проведённая палеомагнитная ориентировка керна показала, что простирание ортогональной системы трещин отрыва на Катильгинской площади составляет 302° и 33°, а трещина скола в скважине Кулеевская № 1 ориентирована под углом 345°. С учетом генетических особенностей проявления трещин отрыва и скола относительно поля сжимающих и растягивающих напряжений пород баженовской свиты ориентировка последней может составлять 300°. Это хорошо согласуется с розой-диаграммой трещиноватости пород юры и неокома Западной Сибири [9], где можно выделить три ортогональные системы трещин 300–30°, 335–65° и 0–90° (рис. 1, В). По данным А.В. Долицкого [10], система трещин 300–30° на Азиатской части материка может соответствовать ортогональному отпечатку глобального ротационного поля напряжений для верхней юры и границе ни-

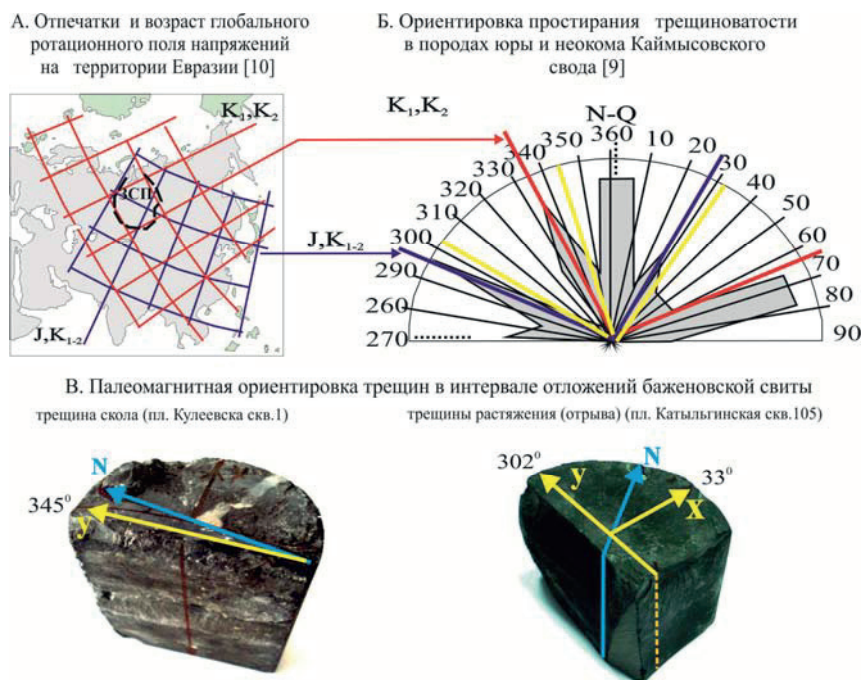


Рис. 1. Примеры проявления планетарной трещиноватости в отложениях баженовской свиты юго-восточной части Западной Сибири

Fig. 1. Examples of planetary fracturing in the Bazhenov suite sediments of the southeastern part of Western Siberia

жного-верхнего мела, отвечая стратиграфическому положению васюганской и нижней части баженовской свит (рис. 1, А). Ортогональная система трещин $330-60^\circ$ выделяется для отложений нижнего и верхнего мела, а $0-90^\circ$ для неоген-четвертичных осадков.

Сопоставление результатов опробования отложений баженовской свиты с особенностями разработки сланцевых толщ Северной Америки

На Кулеевской площади в процессе совместного испытания в открытом стволе баженовской свиты и водонасыщенного по керну и ГИС верхнеюрского пласт Ю₁¹ была получена пластовая вода с плёнкой нефти, поднятой в бурительных трубах. Геохимические исследования показали генетическую принадлежность полученной нефти к отложениям баженовской свиты.

Более детальные испытания баженовской свиты проводились в скважине 2 Глуховской площади, где по результатам интерпретации данных каротажа в интервале 2931–2946 м выделена зона трещиноватости (рис. 2, А). Наличие восьмиметровой пачки георгиевских глин в подошве баженовской свиты и толщи аргиллитов куломзинской свиты в её кровле указывает на высокую гидродинамическую изоляцию зоны трещиноватости от ниже- и вышележащих коллекторов. Отбор керна в интервале прогнозируемой зоны трещиноватости свидетельствует о том, что наиболее значительное снижение выноса керна отмечается по кремнистым и карбонатно-глинистым, кремнистым поро-

дам. В поднятом керне кероген-глинистых пород трещиноватость не наблюдалось.

При испытании в открытом стволе интервала 2932–2947 м за 30 минут при депрессии на пласт 150 атмосфер из отложений баженовской свиты было получено 150 литров нефти.

Испытание в эксплуатационной колонне проводилось в три этапа.

На первом этапе из интервала перфорации 2932–2938 м на динамическом уровне 312 м дебит нефти составил $0,23 \text{ м}^3/\text{сут}$.

На втором этапе интервал перфорации был увеличен (2928–2950 м) и проведена операция воздействия на пласт порохового генератора давления ПГД-БК-100М зарядом 80 кг. В результате проведенных мероприятий пульсирующий дебит нефти на штуцере 1,2 мм составил $0,75 \text{ м}^3/\text{сут}$.

В рамках третьего этапа с целью улучшения притока флюида в интервале 2942,5–2947,5 м была выполнена гидropескоструйная перфорация, однако результаты опробования при этом не изменились.

С позиции генетической природы трещиноватости отложений баженовской свиты проведенные испытания можно рассматриваться в двух вариантах. Первый вариант предусматривает образование зон трещиноватости до бурения скважины, а второй – их проявление в процессе бурения и испытания. В случае наличия зон трещиноватости в баженовской свите до бурения скважины при её вскрытии должно было отмечаться аномально высокое пластовое давление, как это наблюдается на

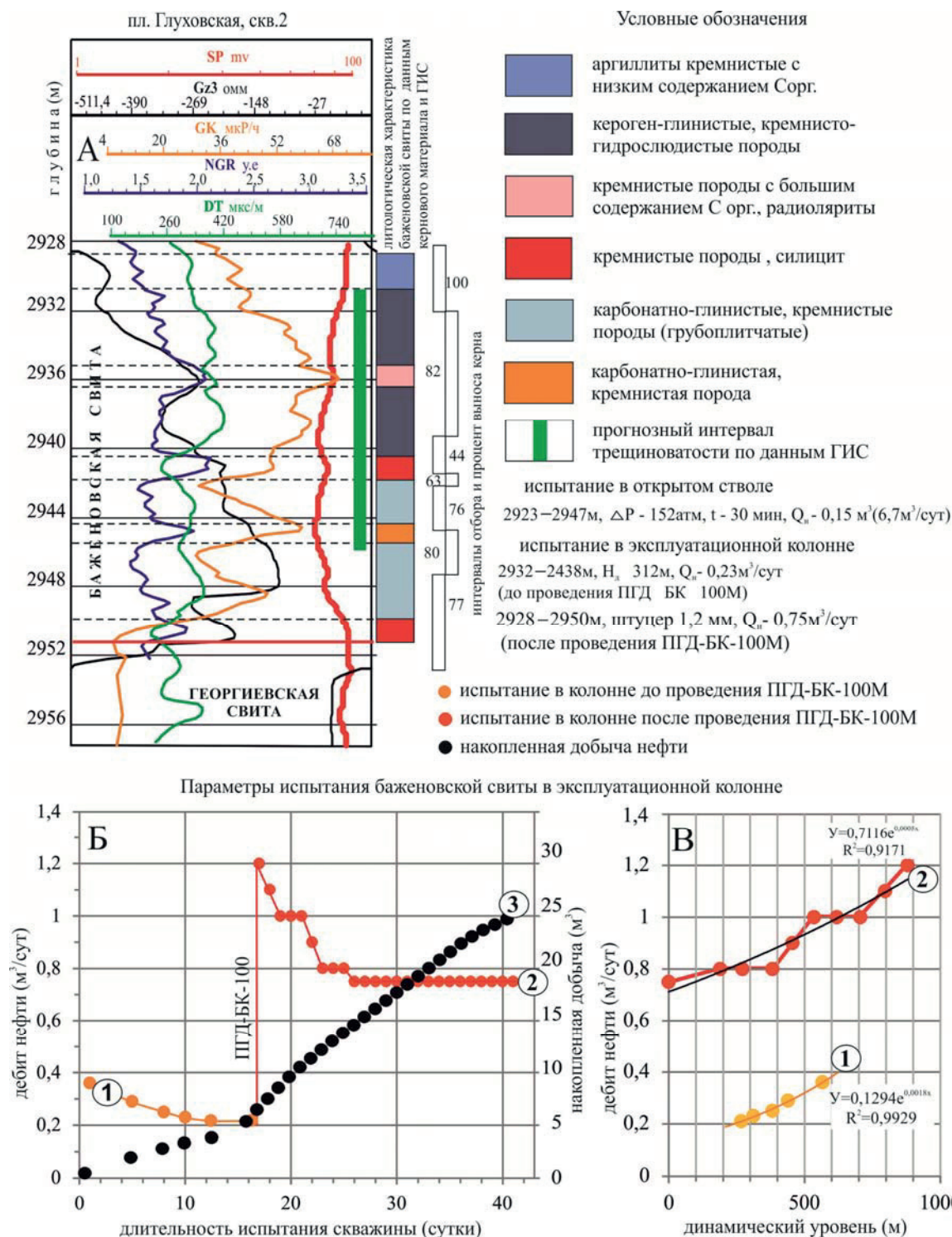


Рис. 2. Литолого-геофизическая характеристика (А) и результаты испытания (Б, В) баженовской свиты в скважине 2 Глуховской площади

Fig. 2. Lithological and geophysical characteristics (A) and test results (Б, В) of the Bazhenov suite in the well № 2 of Glukhovskaya area

Салымском месторождении. Однако результаты испытания свидетельствуют о низкой продуктивности обусловленной ограниченным объёмом пустотного пространства, что может быть свойствен-

но трещинам, образовавшимся в процессе бурения и испытания скважины.

Другая ситуация отмечается после воздействия на пласт порохового генератора давления ПГД-БК-

100М. В соответствии с существующими инструкциями, при массе заряда 80 кг в породе формируется трещина длиной 12–14 м с шириной у стенки скважины 7 мм [11]. Кроме этого на вмещающие породы оказывается термодинамическое и акустическое воздействие, что значительно увеличивает приток нефти из сланцевой толщи в трещину [12]. Рассматривая результаты испытания, можно отметить, что график притока нефти на рис. 2, В отличается от предыдущего. Уменьшение дебита при изменении динамического уровня происходит не постепенно, а ступенчато, и после выхода скважины на перелив её производительность не изменяется в течение 15 дней до прекращения её испытания (рис. 2, В). При этом необходимо отметить, что постоянный дебит нефти свидетельствует о «стабильности» притока из образованной трещины, а объём трещины явно не соответствует накопленной добычи нефти (рис. 2, В).

Учитывая, что роль рабочего агента, обеспечивающего приток углеводородов к забою скважины при разработке сланцевой толщи, выполняет разность порового и забойного давлений, полученный профиль притока нефти можно объяснить развитием планетарной трещиноватости. В процессе оттока нефти в сформированную трещину в микропорах сланцевой толщи формируется свободное пустотное пространство.

При проявлении этого эффекта в зоне напряженного состояния (растяжения) горной породы начнёт формироваться вертикальная трещина отрыва. Вновь сформированная трещина, в свою очередь, может также пересекать зону напряжённого состояния пород. В результате этого запускается процесс

автогенерации вертикальной трещиноватости сланцевой толщи. Продолжительность и масштабы этого процесса будут зависеть от интенсивности оттока углеводородов из микропорового пространства и плотности поля растягивающих напряжений, формирующих общую (планетарную) трещиноватость. Эта плотность зависит от слоистой неоднородности сланцевой толщи и может быть определена по соответствующим графикам, разработанным для рассматриваемого типа трещин [6].

Различная удалённость вновь образованных трещин от ствола скважины и снижение депрессии между поровым и забойным давлением по мере подъёма флюида в эксплуатационной колонне ограничивает участие зон трещиноватости в процессах фильтрации. Дискретность пороговых значений этого процесса отражается ступенчатым характером снижения дебита нефти на графике (рис. 2, В).

В условиях свободного перелива депрессия на забое не меняется, что способствует устойчивой тенденции формирования планетарных трещин отрыва и постоянству дебита нефти.

Результаты испытания скважины Глуховской № 2 после применения порохового генератора давления можно сопоставить с динамикой добычи нефти скважины USA 42–24A в сланцевой толще Bakken после проведения гидроразрыва. Как следует из рис. 3, А, на начальном (техногенном) этапе разработки отмечается быстрое ступенчатое падение добычи нефти от 110 до 55 баррелей в сутки, и в дальнейшем происходит относительно длительная её стабилизация.

В общем плане тенденции динамики дебитов нефти в скважине Глуховская № 2 и USA 42–24A

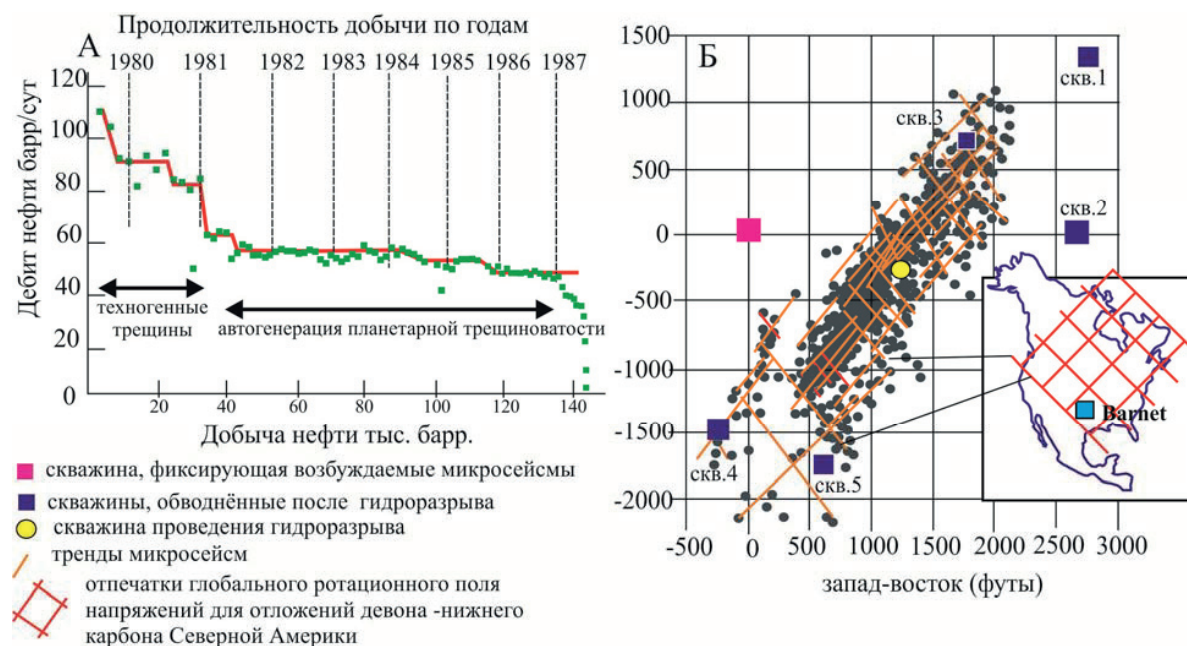


Рис. 3. Результаты разработки скважины USA42–24A сланцевой толщи Bakken (А) и связь микросейсмических исследований с отпечатками ротационного поля напряжений нижнекарбоневой толщи Barnett (Б) после проведения гидроразрыва [13]

Fig. 3. Bakken well (USA42–24A) development results (A) and relation of microseismic studies to the imprints of the Lower Carboniferous Barnett rotational field (B) after fracturing [13]

подобны. В первом приближении, без учёта изменения давления по длине трещины, можно сопоставить потенциальные возможности скважины Глуховская № 2 при параметрах трещины скважины USA 42–24A. При длине и высоте трещины в скважине № 2 Глуховской площади не 12 и 22 м, а 420 и 14,5 м (пл. Bakken, скв. USA 42–24A) начальный дебит нефти в рассматриваемой скважине мог составить 105 баррелей в сутки, а дебит устойчивой добычи – 65 баррелей в сутки. Учитывая, что в скважине USA 42–24A динамика снижения дебита нефти на падающем участке добычи составила 0,1 баррель в сутки, то в скважине Глуховская № 2 этот период мог составить 400 дней. Эти расчётные параметры близки к реально наблюдаемому профилю добычи нефти в скважине USA 42–24A (рис. 3, А).

Роль планетарной трещиноватости в разработке битуминозных аргиллитов можно оценить при микросейсмическом мониторинге, проводимом в процессе гидроразрыва сланцевой толщи. В качестве примера можно провести сопоставление ориентации глобального поля напряжений, выделяемого для отложений девона–карбона Северной Америки, и пространственного распределения микросейсм, фиксируемых при гидроразрыве нижнекарбоновой сланцевой толщи Barnett [13]. Выделяемая область сейсмической активности северо-восточной направленности размером 1000×300 м осложнена многочисленными участками микросейсм северо-восточной и северо-западной ориентировки (рис. 3, Б).

Интерпретируемые авторами тренды сейсмической активности [13] хорошо сопоставляются с полем глобальных напряжений ротационного поля рассматриваемого стратиграфического диапазона данного района (рис. 3, Б) по литературным источникам [10]. Отмечается значительное влияние гидроразрыва на работу скважин за пределами области фиксирования микросейсм. После его проведения ряд скважин, расположенных как в пределах, так и за пределами зоны сейсмической активности, были обводнены, что объясняется поступлением в них жидкости, применяемой при закачке пропантa. Обводнение скважин за пределами зоны сейсмического возбуждения может быть связано с автогенерацией планетарной трещиноватости, сформированной в период эксплуатации этих скважин.

Заключение

Учитывая механизм формирования зон трещиноватости при гидроразрыве сланцевых толщ, можно определить наиболее результативные мето-

ды повышения эффективности разработки этих отложений, позволяющие поддерживать процесс автогенерации планетарной системы трещин. Автогенерация свободных трещин растяжения при проведении гидроразрыва в отложениях баженовской свиты требует поддержания в процессе разработки максимально возможной депрессии между поровым давлением в битуминозных аргиллитах и давлением в трещине гидроразрыва. Это способствует наиболее значительному оттоку углеводородов из сланцевой толщи и образованию свободных трещин растяжения в зонах планетарной напряжённости сланцевой толщи, что увеличивает период работы скважины.

В настоящее время в Западной Сибири проводится обширная программа по выработке наиболее эффективных методик освоения углеводородного потенциала баженовской свиты. Однако «слепое» копирование западных технологий при разработке рассматриваемой сланцевой толщи должного результата не даёт, и в результате этого формируется мнение, что промышленная добыча нефти из битуминозных аргиллитов баженовской свиты нецелесообразна [14].

В то же время необходимо иметь в виду, что основой эффективной разработки битуминозных сланцев Северной Америки является формирование обширной зоны техногенной трещиноватости при гидроразрыве карбонатной толщи Среднего Баккена (рис. 3, В). Это позволяет уже на раннем этапе эксплуатации осуществлять «дренаж» значительных объёмов углеводородов из перекрывающих и подстилающих битуминозных глин. В Западной Сибири литологическое строение баженовской свиты неоднородно [15–18]. Незначительные по толщине прослойки кремнистых и карбонатных разностей «рассеяны» в разрезе баженовской свиты, в результате чего обширной зоны трещиноватости при ГРП, способной дренировать большую площадь битуминозных глин, не образуется. Необходимо разрабатывать методику, позволяющую активизировать планетарную трещиноватость непосредственно в сланцевой толще.

Основная задача этого направления состоит в определении оптимального режима опробования, который можно отрабатывать на скважинах эксплуатационного фонда месторождений юрского комплекса, выведенных из разработки [19, 20]. Проводя в таких скважинах перфорацию баженовской свиты с последующим применением порохового генератора давления можно найти оптимальный режим освоения, который в дальнейшем можно будет применять на скважинах с гидроразрывом сланцевой толщи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глейзер К.С., Джонсон Г.М., Кляйнберг Р.Л. Поиски высокопродуктивных зон: качество коллектора и качество заканчивания в органогенных сланцах // Нефтегазовое обозрение. – 2013. – С. 66–85. URL: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/russia13/win13/article5.pdf (дата обращения 15.08.2017).
2. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale / D. Xu, R. Hu, W. Gao, J. Xia // Petroleum Exploration and Development. – 2015. – V. 42. – P. 573–579.
3. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs / B. Hou, M. Chen, Z. Li, Y. Wang, C. Diao // Petroleum Exploration and Development. – 2014. – V. 41. – P. 833–838.
4. Wang X., Gao S., Gao C. Geological features of Mesozoic lacustrine shale gas in south of Ordos Basin, NW China // Petroleum Exploration and Development. – 2014. – V. 41. – P. 326–337. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380414600379> (дата обращения 23.05.2017).
5. Bakken Tight Oil congress. Denver, CO, May 30–31, 2012. URL: <http://www.bakken-tight-oil.com> (дата обращения 23.05.2017).
6. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещинных коллекторов. – М.: Недра, 1971. – 160 с.
7. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость // Планетарная трещиноватость. – 1973. – № 8. – С. 5–37.
8. Методика изучения трещиноватости пород закрытых платформенных территорий / К.И. Микуленко, А.И. Зоткевич, И.А. Пехтерева, Г.Г. Шемин // Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геол., геофиз. и минер. сырья. – 1972. – Вып. 132. – 99 с.
9. Микуленко К.И., Шемин Г.Г. Трещиноватость юрских и нижнемеловых пород Обь-Иртышского междуречья // Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геол., геофиз. и минер. сырья. – Новосибирск. 1971. – Вып. 132. – С. 90–101.
10. Долицкий А.В. Реконструкции тектонических структур. – М.: Недра, 1978. – 148 с.
11. Гребенников В.Т. Технологии воздействия на продуктивный пласт генераторами давления и горюче-окислительными жидкостями. – М.: ЗАО «ЮНАЙТЕДНОРД», 2008. – 45 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/1496581/> (дата обращения 23.05.2017).
12. Абрамова. О.П., Манулик П.В. Роль поровых растворов глинистых отложений в системе сопряжённого нефтидо- и рудогенеза // Электронный журнал Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. URL: http://oilgasjournal.ru/vol_4/abramova.html (дата обращения 23.05.2017).
13. Integrating Fracture Mapping Technologies to Optimize Stimulations in the Barnett Shale / M.K. Fisher, B.M. Davidson, A.K. Goodwin, E.O. Fielder, W.S. Buckler, N.P. Steinsberger // SPE Convention. – San Antonio, 2002. URL: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-77441-PA> (дата обращения 23.05.2017).
14. Гладков Е.А. Испытание новых технологий при разработке баженовской свиты в Западной Сибири // Горные ведомости. – 2016. – № 1, 2. – С. 146–152. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25378319> (дата обращения 23.05.2017).
15. Classification of rocks of the Bazhenov Formation / A.E. Kontorovich, P.A. Yan, A.G. Zamirailova, E.A. Kostyreva, V.G. Eder // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – V. 57. – № 11. – P. 1606–1612.
16. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the west Siberian Basin, Russia: the role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir / M.V. Shal'dybin, Y.M. Lopushnyak, I.V. Goncharov, M.J. Wilson, L. Wilson, B.G. Mendis // Applied Clay Science. – 2017. – V. 136. – P. 75–89.
17. Geochemical methods for prediction and assessment of shale oil resources (case study of the Bazhenov Formation) / M.B. Skvortsov, M.V. Dakhnova, S.V. Mozhegova, A.M. Kirsanov, I.K. Komkov, I.L. Paizanskaya // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – V. 58. – № 3–4. – P. 403–409.
18. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia / Y.N. Zanin, V.G. Eder, A.G. Zamirailova, V.O. Krasavchikov // Chemie der Erde – Geochemistry. – 2010. – V. 70. – № 4. – P. 363–376.
19. Belozеров V.B., Baranov V.E., Dmitriev A.Y. Petroleum Generation Potential of Bituminous Mudstones in Tomsk Region Bazhen Suite (Western Siberia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 24. – С. 1–6. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012036> (дата обращения 23.05.2017).
20. Белозёров В.Б. Особенности формирования зон трещиноватости при гидроразрыве сланцевых толщ // EGA/SPE Joint Workshop on Shale Oil. – 2015. – 4 с. URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=79880> (дата обращения 23.05.2017).

Поступила 01.12.2017 г.

Информация об авторах

Белозёров В.Б., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры проектирования объектов нефтегазового комплекса Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК:662.276:550.8.052

OPEN-FRACTURED BAZHENOV SUITE AND ITS FUTURE DEVELOPMENT

Vladimir B. Belozеров,

belozerovvb@hw.tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance Development of shale-oil as a potential crude hydrocarbon source is the most pressing issue for production depression areas with well-developed infrastructure. This regards West Siberian petroleum province, where «shale oil» is associated with Bazhenov suite bituminous shale, indicating proven commercial productivity within several areas.

The aim of the research is to estimate the role of planetary fracturing in Bazhenov suite bituminous shale deposits for enhancing shale-oil development efficiency and to identify auto-generation conditions of planetary fracturing based on Bazhenov suite sampling results.

Research target: Jurassic–Cretaceous bituminous shale in Bazhenov suite, southeast West Siberian Plate.

Research methodology is based on the following correlation: abstract theorem of planetary fracturing to both surveys of fractured Bazhenov suite deposits, sampling results from Glukhovskiy well № 2 and fundamental features of shale formation Bakken and Barnett development in North America.

Results. The analysis performed, being based on published sources and core data, indicated a significant development of vertical rupture within Bazhenov suite formation section. The geological age correlation between the identified fracture systems and global rotation stress field traces within Eurasia territories was revealed. Identical oil inflow dynamics was determined on the basis of Bazhenov suite sampling data via both powder generator of pressure in Glukhovskiy area and shale formation hydrofracturing in USA 42–24A well within Bakken formation (North America).

Key words:

Bazhenov suite, fracturing, hydrofracturing, pore pressure, shale formation, stress field.

REFERENCES

- Glejzer K.S., Jhonson G.M., Klyaynberg R.L. Seeking the Sweet Spot: Reservoir and Completion Quality in Organic Shales. *Oilfield Review*, 2013, vol. 25, no. 4. Available at: http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield_review/russia13/win13/article5.pdf (accessed 15 August 2017).
- Xu D., Hu R., Gao W., Xia J. Effects of laminated structure on hydraulic fracture propagation in shale. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, vol. 42, pp. 573–579.
- Hou B., Chen M., Z Li., Wang Y., Diao C. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, vol. 41, pp. 833–838.
- Wang X., Gao S., Gao C. Geological features of Mesozoic lacustrine shale gas in south of Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, vol. 41, pp. 326–337. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876380414600379> (accessed 23 May 2017).
- Bakken Tight Oil congress. Denver, CO, May 30–31, 2012. Available at: <http://www.bakken-tight-oil.com> (accessed 23 May 2017).
- Rats M.V., Chernyshev S.N. *Treshchinovatost i svoystva treshchinnykh kollektorov* [Jointing and features of fractured reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 160 p.
- Shults S.S. Planetarnaya treshchinovatost [Planetary jointing]. *Planetarnaya treshchinovatost*, 1973, no. 8, pp. 5–37.
- Mikulenka K.I., Zotkevich A.I., Pekhtereva I.A., Shemin G.G. Metodika izucheniya treshchinovatosti porod zakrytykh platformnykh territoriy [Method of studying rock jointing of closed platform areas]. *Trudy Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya*, 1972, Iss. 32, 99 p.
- Mikulenka K.I., Shemin G.G. Treshchinovatost yurskikh i nizhnemelovykh porod Ob-Irtyshskogo mezhdurech'ya [Jointing of Jurassic and Low Cretaceous rocks of Ob-Irtysh interfluvial]. *Trudy Sibirskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii, geofiziki i mineralnogo syr'ya*, 1971, Iss. 132, pp. 90–101.
- Dolitskiy A.V. *Rekonstruktsii tektonicheskikh struktur* [Tectonic structure reconstruction]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 148 p.
- Grebennikov V.T. *Tekhnologii vozdeystviya na produktivnyy plast generatorami davleniya i goryuche-okislitelnyimi zhidkostyami* [Technique of pressure generator and flammable-oxidizing fluid effect on productive strata]. Moscow, Yunaytednord Publ., 2008. 45 p. Available at: <http://www.twirpx.com/file/1496581/> (accessed 23 May 2017).
- Abramova. O.P., Manulik P.V. The role of clay pore water in the system of the genetic revolution ships of petroleum and ores. *Georesursy. Geoenergetika. Geopolitika*. In Rus. Available at: http://oilgasjournal.ru/vol_4/abramova.html (accessed 23 May 2017).
- Fisher M.K., Davidson B.M., Goodwin A.K., Fielder E.O., Buckler W.S., Steinsberger N.P. Integrating Fracture Mapping Technologies to Optimize Stimulations in the Barnett Shale. *SPE Convention*. San Antonio, 2002. Available at: <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-77441-PA> (accessed 23 May 2017).
- Gladkov E.A. test of new techniques when exploring Bazhenov formation in Western Siberia. *Gornye vedomosti*, 2016, no. 1, 2, pp. 146–152. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25378319> (accessed 23 May 2017).
- Kontorovich A.E., Yan P.A., Zamirailova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G. Classification of rocks of the Bazhenov Formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 11, pp. 1606–1612.
- Shaldybin M.V., Lopushnyak Y.M., Goncharov I.V., Wilson M.J., Wilson L., Mendis B.G. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the west Siberian Basin, Russia: the role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 136, pp. 75–89.
- Skvortsov M.B., Dakhnova M.V., Mozhegova S.V., Kirsanov A.M., Komkov I.K., Paizanskaya I.L. Geochemical methods for prediction and assessment of shale oil resources (case study of

- the Bazhenov Formation). *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 403–409.
18. Zanin Y.N., Eder V.G., Zamirailova A.G., Krasavchikov V.O. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2010, vol. 70, no. 4, pp. 363–376.
19. Belozerov V.B., Baranov V.E., Dmitriev A.Y. Petroleum Generation Potential of Bituminous Mudstones in Tomsk Region Bazhen Suite (Western Siberia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 24, pp. 1–6. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012036> (accessed 23 May 2017).
20. Belozorov V.B. Osobennosti formirovaniya zon treshchinovosti pri gidrorazryve slantsevykh tolshch [Peculiarities of formation of fractured zones at fracturing shale formations]. *EGA/SPE Joint Workshop on Shale Oil*, 2015, 4 p. Available at: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=79880> (accessed 23 May 2017).

Received: 1 December 2017.

Information about the authors

Vladimir B. Belozerov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 24.01.2018. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,61. Уч.-изд. л. 16,83.
Заказ 06-18. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ