

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



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Инжиниринг георесурсов

Том 326, № 8, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
Инжиниринг георесурсов**

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY

Geo Assets Engineering

Volume 326, № 8, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

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

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2015

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Результаты U–PB SHRIMP–II и AR–AR датирования магматических образований междуречья Сёртынья–Щекурья (Приполярный Урал)**
Кудрин К.Ю., Иванов К.С., Шокальский С.П., Наставко Е.В.
- Расчет производительности ветроэнергетической установки большой мощности по усовершенствованной методике**
Голдаев С.В., Радюк К.Н.
- Газохроматографическое определение спиртов как трассеров при мониторинге нефтяных месторождений на полиметилсилоксановой фазе с ацетилацетонатом кобальта**
Гавриленко М.А., Газиева Е.А., Шумар С.В., Егошина А.В., Кирсанова И.В., Гавриленко М.М.
- Исследование волновых процессов обмоток трансформатора как цепи с распределенными параметрами**
Исаев Ю.Н., Старцева Е.В., Щекотуев А.В.
- Математическое моделирование теплового режима здания с учетом инсоляционных теплопоступлений**
Стрижак П.А., Морозов М.Н.
- Моделирование температурного режима формирования дунитов кингашского ультрамафитового массива (Северо-запад Восточного Саяна)**
Юричев А.Н., Чернышов А.И.
- Оптимальное (энергоэффективное) теплоснабжение здания в системе центрального отопления**
Сабденов К.О., Байтасов Т.М.
- PADME – новый код для моделирования процесса формирования георесурсов планет на гетерогенных вычислительных системах**
Протасов В.А., Куликов И.М.
- Комплексометрическое дифференцированное определение меди (II) и цинка (II) с использованием математической модели процесса**
Шумар С.В., Гавриленко М.А., Кузьминская Е.А.
- Геохимические особенности распределения урана в отложениях Пур–тазовской нефтегазоносной области (северо–восток Западной Сибири)**
Исаева Е.Р., Столбова Н.Ф.
- Исследование размеров частиц оксалата кальция, полученных осаждением из азотнокислых растворов**
Селявский В.Ю., Буйновский А.С., Софронов В.Л., Селявская Е.В.
- Математическая модель электроагрегата мини–ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора**
Вагин Г.Я., Солнцева Е.Б., Мамонов А.М., Петров А.А.
- Переходные режимы течения при гравитационном стекании ривулетов по нижней стороне наклонной пластины**
Дехтярь Р.А., Накоряков В.Е., Овчинников В.В., Слесарева Е.Ю.
- Исследование влияния тонкодисперсного шлама на свойства буровых промывочных жидкостей при бурении скважин комплексами со съемными керноприемниками на талнахском рудном узле**
Неверов А.Л., Рожков В.П., Каратаев Д.Д., Матвеев А.В., Юрьев П.О.
- Анализ и научное обобщение результатов исследований ударно–вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок**
Шадрина А.В., Саруев Л.А.
- 6 The results of U–PB SHRIMP–II and AR–AR dating of magmatic formations in Sertynya–Shekurya interfluvium (Prepolar Urals)**
Kudrin K.Yu., Ivanov K.S., Shokalskiy S.P., Nastavko E.V.
- 17 Calculating the performance of high–power wind turbine by the improved methodology**
Goldaev S.V., Radyuk K.N.
- 23 Gas chromatographic determination of alcohols as tracers in monitoring oil fields with polymethylsilicone phase modified by cobalt acetylacetonate**
Gavrilenko M.A., Gazieva E.A., Shumar S.V., Kirsanova I.V., Egoshina A.V., Gavrilenko M.M.
- 29 Investigation of wave processes of transformer windings as a distributed electric circuit**
Isaev Y.N., Startseva E.V., Schekotuev A.V.
- 36 Mathematical simulation of building thermal regime including solar gains**
Strizhak P.A., Morozov M.N.
- 47 Simulation of formation temperature of dunites from Kingashsky ultramafic massif (North–Western part of Eastern Sayan)**
Yurichev A.N., Chernyshov A.I.
- 53 Optimal (energy efficient) heat supply to buildings in central heating system**
Sabdenov K.O., Baitasov T.M.
- 61 PADME – a new code for modeling planet georesources formation on heterogeneous computing systems**
Protasov V.A., Kulikov I.M.
- 71 Complexometric differential determination of copper (II) and zinc (II) using mathematical model of the titration process**
Shumar S.V., Gavrilenko M.A., Kuzminskaya E.A.
- 79 Features of uranium distribution in sediments of Pur–Tazovsky oil-and-gas area (northeast of Western Siberia)**
Isaeva E.R., Stolbova N.F.
- 86 The research of particle size of calcium oxalate obtained by precipitation from nitrate solutions**
Selyavskiy V.Yu., Buynovskiy A.S., Sofronov V.L., Selyavskaya E.V.
- 92 Mathematical model of mini–CHP based on salient–pole synchronous generator**
Vagin G.Ya., Solntsev E.B., Mamonov A.M., Petrov A.A.
- 102 Transitional regimes of rivulet gravity flow on the bottom side of an inclined plate**
Dekhtyar R.A., Nakoryakov V.E., Ovchinnikov V.V., Slesareva E.Yu.
- 110 Study of finely divided sludge effect on drilling fluids properties while drilling with complexes with detachable core receiver at Talnakhskoe deposit**
Neverov A.L., Rozhkov V.P., Karataev D.D., Matveev A.V., Yuryev P.O.
- 120 Analysis and science–based compilation of the results of studying percussion–rotary underground slimhole digging**
Shadrina A.V., Saruev L.A.

УДК 552.11 (470.5)

РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb SHRIMP-II И AR-AR ДАТИРОВАНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕЖДУРЕЧЬЯ СЁРТЫНЬЯ-ЩЕКУРЬЯ (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Кудрин Константин Юрьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. геологии Института природопользования Югорского государственного университета, Россия, 628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. E-mail: kudringeo@inbox.ru

Иванов Кирилл Святославич,

д-р. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией региональной геологии и геотектоники Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, 620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7. E-mail: ivanovks55@ya.ru

Шокальский Сергей Павлович,

канд. геол.-минерал. наук, заведующий отделом Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний проспект, 74. E-mail: Sergey_Shokalsky@vsegei.ru

Наставко Екатерина Вячеславовна,

канд. геол.-минерал. наук, инженер 1 категории ОАО «Кузбассгипрошахт», Россия, 650610, г. Кемерово, ул. Николая Островского, 34. E-mail: evnastavko@ya.ru

Актуальность работы. В последние годы большое внимание уделяется проблеме возрастной идентификации интрузивных образований восточного склона Среднего, Северного и Приполярного Урала в связи с отсутствием в их окружении вмещающих стратиграфических образований с надёжной палеонтологической характеристикой. Получаемые при этом результаты зачастую имеют значения гораздо древнее, чем было принято считать. Этот факт положил начало пересмотру имеющихся представлений об эволюции магматизма данного района.

Цель работы: уточнение схемы развития магматизма территории на основании комплекса геологических наблюдений и результатов аналитических исследований.

Методы исследования. Минералогические исследования проведены на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCAEnergy 350 с детектором X-Max-80 (Oxford Instruments Analytical Ltd.) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 0,3–0,5 нА, время при наборе спектров 10 с (Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, аналитик Н.С. Карманов). Абсолютный возраст определён Ar-Ar методом по порообразующим амфиболам габбро и диоритов (Новосибирск, Институт геологии и минералогии СО РАН, аналитик А.В. Травин). U-Pb локальное датирование цирконов габбро и диоритов выполнено с помощью вторично-ионного микрозонда высокого разрешения SHRIMP-II (ЦИИ, ВСЕГЕИ) по методике, описанной I.S. Williams (1998). Коррекция на нерадиоγενный свинец проводилась по измеренному ^{204}Pb и современному изотопному составу свинца в модели Стейси-Крамера.

Результаты. Проведено изучение и датирование габбро и диоритов, слагающих крупные структурно-вещественные блоки на восточном склоне Приполярного Урала – Щекуринский и Сёртыньинско-Щекуринский массивы. Большинство изученных цирконов имеют замкнутую U-Pb изотопную систему с конкордантными (согласующимися) или субконкордантными возрастными (степень дискордантности $\pm 5\%$). Полученные датировки демонстрируют значительно более ранние возраста изученных объектов, чем это считалось ранее: магматический возраст габбро тагилыктылымского комплекса в структуре Щекуринского массива принят $498 \pm 6,5$ млн лет по Ar-Ag датировке по амфиболу, габбро северорудничного комплекса – $465,2 \pm 6,5$ млн лет по Ar-Ag датировке по амфиболу, диоритов Сёртыньинско-Щекуринского массива – $461-471$ млн лет по U-Pb датировке по циркону. Предполагается: 1) «молодые» (430 ± 5 млн лет) цирконы указывают на время метаморфизма габбро тагилыктылымского комплекса; 2) «древние» (1992–1994 и 620–650 млн лет) цирконы диоритов северорудничного комплекса ксеногенные и указывают на события под Тагильским островодужным террейном в фундаменте прилегающей с запада платформы, попавшего в зону субдукции, и на события в верхней мантии соответственно. Установленные РТ-параметры формирования интрузивных пород свидетельствуют о временном разрыве между внедрением расплава и началом кристаллизации амфиболов, что указывает на более ранний возраст интрузий, нежели принято нами по результатам Ar-Ag датирования.

Ключевые слова:

Приполярный Урал, палеоостроводужный сектор, магматизм, абсолютный возраст, циркон, уран-свинцовое датирование, амфиболы, аргон-аргоновое датирование.

Введение

В последние годы большое внимание уделяется проблеме возрастной идентификации интрузив-

ных образований восточного склона Среднего, Северного и Приполярного Урала в связи с отсутствием в их окружении вмещающих стратиграфиче-

ских образований с надёжной палеонтологической характеристикой [1, 2]. Получаемые при этом результаты определения абсолютных возрастов зачастую имеют значения гораздо древнее, чем было принято считать. Этот факт положил начало пересмотру имеющихся представлений об эволюции магматизма данного района [3].

Представляемые результаты являются продолжением начатых в данном направлении работ. Объектами изучения являются габброиды Щекуринского массива и диориты Сёртыньинско-Щекуринского массива на восточном склоне Приполярного Урала, которые опробованы при проведении полевых исследований (рис. 1).

U–Pb локальное датирование цирконов габбро и диоритов выполнено с помощью вторично-ионного микросонда высокого разрешения SHRIMP-II (ЦИИ, ВСЕГЕИ) по методике, описанной в работе [4]. Коррекция на нерадиоогенный свинец проводилась по измеренному ^{204}Pb и современному изотопному составу свинца в модели Стейси–Крамера [5].

В строении габбрового Щекуринского массива, который является северным продолжением крупного Хорасюрского массива, участвуют два типа габброидов, различающиеся по минералогическим, петрохимическим и геохимическим особенностям [6]. В соответствии с [7] они сопоставлены с тагилокытлымским (более древние) и северорудничным комплексами. В береговых обнажениях р. Сёртынья между ними задокументирован интрузивный контакт (с зоной закалки): полосчатые амфиболовые габбро тагилокытлымского комплекса (распространены преимущественно в западной части Щекуринского массива) прорваны массивными амфибол-пироксеновыми габбро северорудничного комплекса.

Оба типа габброидов прорываются диоритами Сёртыньинско-Щекуринского массива, которые по совокупности петрогеохимических признаков рассматриваются как вторая фаза становления северорудничного комплекса [6].

РТ-параметры образования и преобразования пород

РТ-условия формирования интрузивных образований оценивались разными дополняющими друг друга способами: на основе однопироксенового геотермометра Мерсье [8] – для пироксен-амфиболовых диоритов и массивных пироксен-амфиболовых габбро, амфиболовым [9–11], титаномагнетитовым [12] и магнетит-ильменитовым [13] геобаротермометрами – для всех пород.

Полосчатые габбро тагилокытлымского комплекса. Амфиболы полосчатых габбро характеризуются плеохроизмом от светло-зелёной до густой сине-зелёной окраски и по составу отвечают ряду эденит-паргасит-ферроэденит-ферропаргасит, единичные зерна – чермакиту, магнезиальной роговой обманке и актинолиту; весь амфибол пробы 11 соответствует магнезиальной роговой обманке (рис. 2).

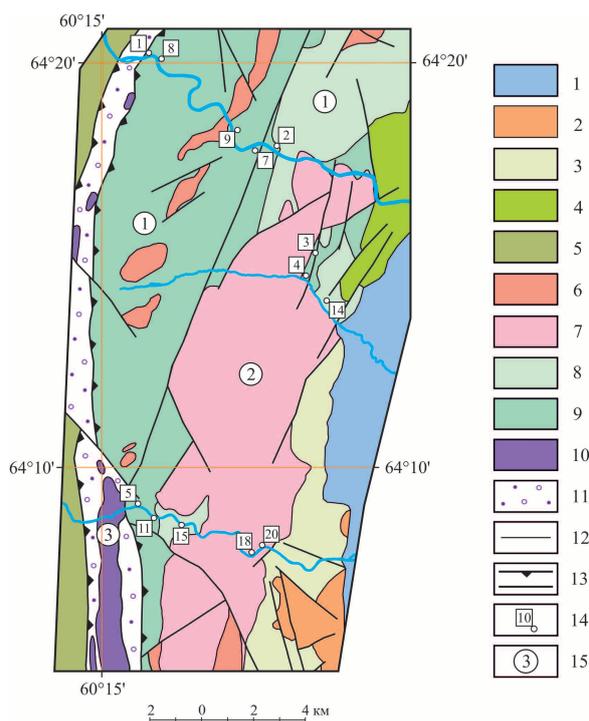


Рис. 1. Схема минералогического опробования Щекуринского и Сёртыньинско-Щекуринского массивов. Составлена с использованием материалов М.М. Павлова (1990), В.В. Бочкарева [14], результатов аэромагнитной съёмки (А.В. Чурсин, 2009) и данных авторов статьи. 1 – мезозойско-кайнозойские отложения; 2 – палеоконтинентальный сектор Урала; 3 – вулканы рувшорской толщи; 4 – базальты и долериты комплекса параллельных даек; 5 – эффузивы соимшорской толщи; 6 – плагиограниты невыясненной принадлежности; 7 – диориты северорудничного комплекса; 8 – габброиды северорудничного комплекса; 9 – габброиды тагилокытлымского комплекса; 10 – гипербазиты салатимского комплекса; 11 – зона ГУГР; 12 – геологические границы; 13 – надвиги и разрывные нарушения; 14 – точки отбора проб и их номера; 15 – массивы: 1 – Щекуринский; 2 – Сёртыньинско-Щекуринский; 3 – Сёртыньинский

Fig. 1. Mineralogical testing of Shchekurinskii and Sertyninskii massifs. Based on the materials of M.M. Pavlov (1990), V.V. Bochkareva [14], aeromagnetic survey results (A.V. Chursin, 2009) and the data of the authors of the given paper. 1 – Mesozoic-Cainozoic deposits; 2 – paleo-continental sector of the Urals; 3 – volcanics of ruvshorskaya formation; 4 – basalts and dolerites in the parallel dyke complex; 5 – effusives of simshorsk formation; 6 – plagiogranites of uncertain belonging; 7 – diorites of north-mining complex; 8 – gabbroids of north-mining complex; 9 – gabbroids of tagilokytlymskiy complex; 10 – ultrabasic rocks of salatimsk complex; 11 – area of the Main Uralian Deep Break; 12 – geological boundaries; 13 – overlap folds and faults; 14 – sampling points and their numbers; 15 – massifs: 1 – Shchekurinskii; 2 – Sertyninskii-Shchekurinskii; 3 – Sertyninskii

В табл. 1 приведены РТ-параметры, полученные по амфиболовым геотермометрам: температура варьирует от 592 до 843 °С, при давлении от

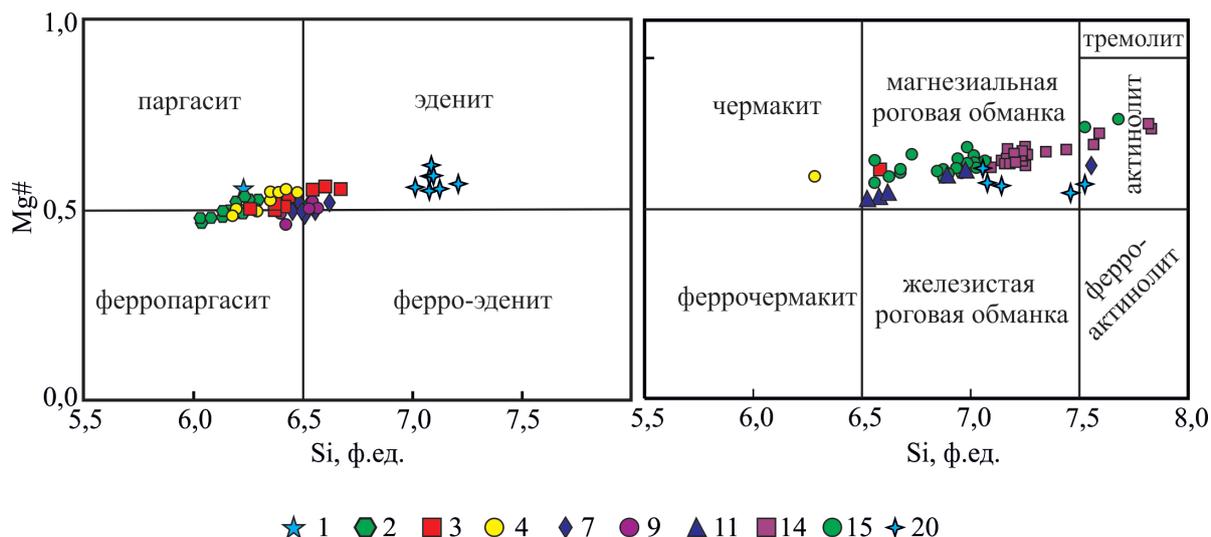


Рис. 2. Положение составов амфиболов полосчатых (точки 1–11) и массивных (точки 14, 15) габбро Щекурьинского массива и диоритов (точка 20) Сёртынтинско-Щекурьинского массива на диаграмме Si ф.ед. – Mg# [15]. Условные обозначения – в соответствии с нумерацией образцов на рис. 1

Fig. 2. Compositions of amphiboles banded (points 1–11) and massive (points 14, 15) of the gabbro of Shchekurinskiy massif and diorites (point 20) of Sertynynsko-Shchekurinskiy massif on the diagram Si ф.ед. – Mg# [15]. The symbols corresponds to sample numeration in Fig. 1.

4,7 до 10,8 кбар. Для актинолита в образце 7 рассчитанная температура составила 545 °С.

Титаномагнетит полосчатых габбро характеризуется структурами распада твёрдого раствора с образованием полосовидных выделений вторичного ильменита и игольчатого рутила, по которым развивается вторичный сфен (рис. 3, А, Б).

Основываясь на составе пар титаномагнетит-ильменит, изученных в образцах 3 (одна пара), 4 (шесть пар) и 9 (четыре пары), температура составила диапазон от 750 до 854 °С, что выше температур, полученных при помощи амфиболовых термометров.

Исходя из рассчитанных РТ-параметров, можно говорить о том, что для полосчатых габбро их максимальные значения фиксируют условия кристаллизации породы или существенно приближены к ним, постепенное их понижение указывает на постмагматические преобразования, а минимальные отражают метаморфические преобразования.

Таким образом, температура кристаллизации полосчатых габбро принимается нами в диапазоне 750–854 °С при давлении 10,5–10,8 кбар (глубина порядка 32 км). Температура постмагматических

и метаморфических изменений фиксируется в диапазоне 600–720 °С на фоне снижения давления до 4,7 кбар, что можно объяснить перемещением кристаллизующегося материала к поверхности (до глубины 14 км).

Массивные габбро северорудничного комплекса. Пироксен, изученный в образце 14, однороден, соответствует диопсиду, состав которого по результатам 9 электронно-зондовых измерений (%): En 38–39, Fs 14–16, Wo 46–48. Температура его образования составила диапазон от 923 до 1016 °С. По всей видимости эту температуру достаточно достоверно можно принять за условия образования габбро.

Амфиболы массивных габбро обладают плеохроизмом от бледно-бурой до темно-грязно-зелёной окраски и отвечают по составу магнезиальной роговой обманке (рис. 2), реже актинолиту. РТ-параметры, полученные по различным амфиболовым геотермометрам, приведены в табл. 2.

Из образца 14 изучены составы двух пар магнетит-ильменит (рис. 3, В, Г). Температура составила 546–571 °С, что практически полностью совпадает с температурами метаморфических преобразований породы, приведших к образованию актиноли-

Таблица 1. РТ-параметры полосчатых габбро тагилуктылымского комплекса по амфиболам

Table 1. RT-parameters of banded gabbro of tagiloktylmsky complex by amphiboles

Геотермобарометры Geothermobarometer	№ образца/Sample						
	1	2	3	4	7	9	11
Барометры/Barometers							
Hammastrom, Zen, 1986 P (±3 кбар)	9,7	7,7–10	5,4–7,8	6,1–8,9	4,7–6,7	5,1–6,6	5,2–6,6
Hollister et al, 1987 P (±1 кбар)	10,5	8,2–10,8	5,7–8,4	6,5–9,6	5,0–7,1	5,4–7,1	5,5–7,0
Термометры/Thermometers							
Otten, 1984	718	637–683	623–697	643–723	675–843	639–705	592–648

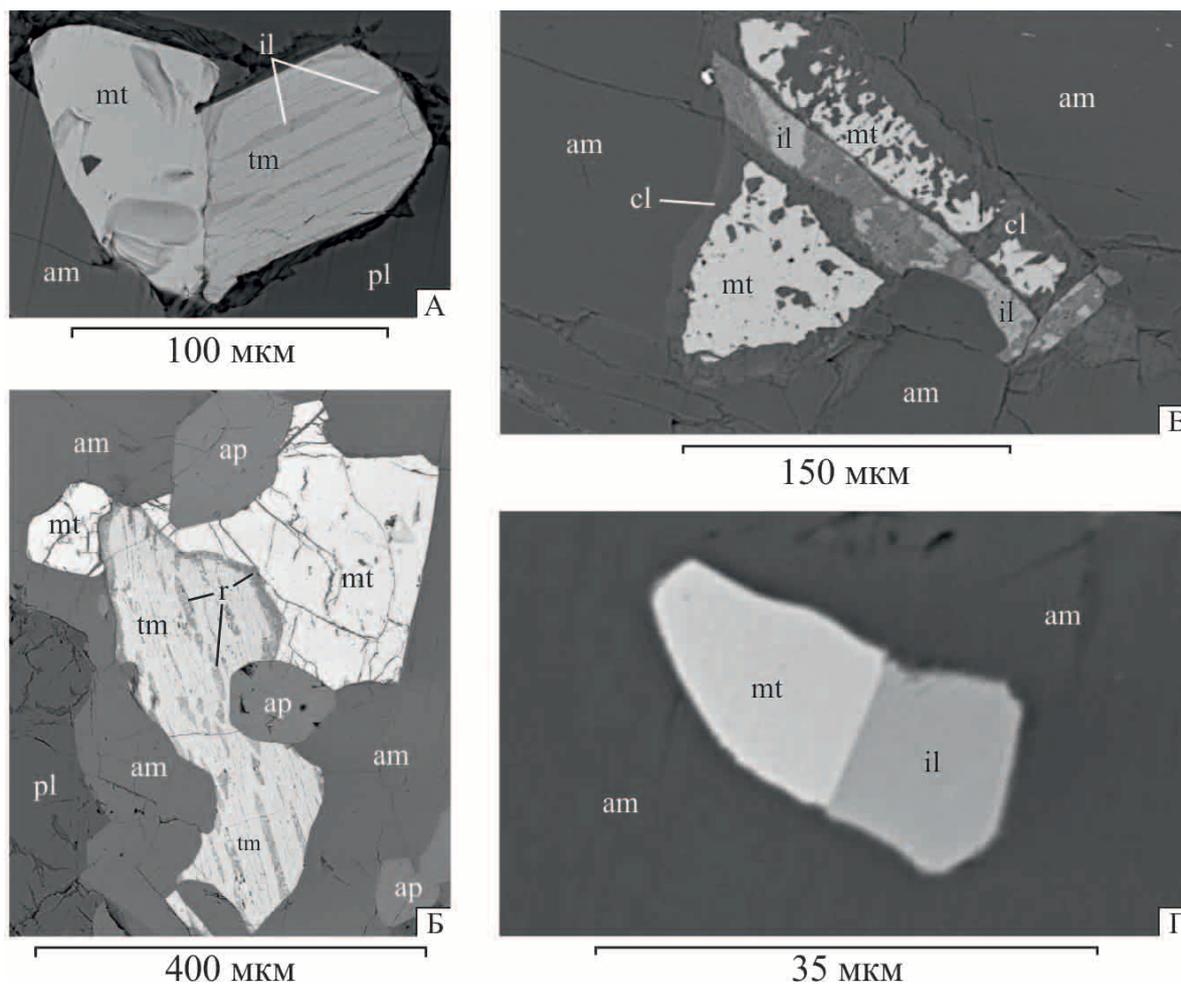


Рис. 3. Магнитные акцессорные минералы габброидов Щекуринского массива. Полосчатые габбро тагилोकытлымского комплекса: образцы А – 4; Б – 2; массивные габбро северорудничного комплекса: образец В, Г – 14 в соответствии с рис. 1. *mt* – магнетит; *tm* – титаномагнетит; *il* – ильменит; *pl* – плагиоклаз; *am* – амфибол; *ap* – апатит; *r* – рутил; *cl* – хлорит

Fig. 3. Magnetic accessory minerals of gabbroids of Shchekurinskiy massif. Banded gabbro of tagilokytylymsk complex: samples А – 4; Б – 2; massive gabbro of north-mining complex: sample В, Г – 14 according to Fig. 1. *mt* – magnetic iron; *tm* – titanomagnetite; *il* – ilmenite; *pl* – plagioclase; *am* – amphibole; *ap* – apatite; *r* – rutile; *cl* – chlorite

та (545–593 °С), полученных при помощи амфиболовых термометров.

Таким образом, температура кристаллизации массивных габбро принимается нами в диапазоне 923–1016 °С, температура постмагматических процессов – 600–920 °С, метаморфических преоб-

разований – 545–593 °С. Значение давления, при котором происходила кристаллизация магматического расплава, определить не удалось; давление, при котором протекали постмагматические и метаморфические процессы, составило 0,1–4,7 кбар, что отражает глубину от 0,3 до 14 км.

Таблица 2. РТ-параметры массивных пироксен-амфиболовых габбро и пироксен-амфиболовых диоритов по амфиболу

Table 2. RT-parameters of massive pyroxene-amphibole gabbro and pyroxene-amphibole diorites by amphibole

Геотермобарометры Geothermobarometer	№ образца/Sample						
	Габбро/Gabbro				Диорит/Diorite		
	14		15		20		
	Hbl	Act	Hbl	Act	Ed	Hbl	Act
Барометры/Barometer							
Hammastrom, Zen, 1986, P (±3 кбар)	до 1,5	–	1,8–4,5	–	до 1,3	0,4–0,9	–
Hollister et al, 1987, P (±1 кбар)	до 1,4	–	1,6–4,7	–	до 1,1	0,1–0,7	–
Термометры/thermometer							
Otten, 1984	600–717	545–593	614–789	545–582	695–749	715–743	569–574

Ed – эденит, *Hbl* – роговая обманка, *Act* – актинолит.

Ed – edenite, *Hbl* – hornblende, *Act* – actinolite.

Диориты северорудничного комплекса. Пироксен изучен в образце 20 и соответствует диопсиду, по результатам 17 электронно-зондовых измерений (%): En 34–40, Fs 16–22, Wo 42–46. Температура образования составила от 1094 до 1192 °С, что достаточно близко к параметрам, полученным на основе составов ильменита и магнетита. Данную температуру, по всей видимости, можно отождествлять с условиями формирования породы.

Основываясь на составе двух пар магнетит–ильменит, изученных в образце 20, температура образования составила 1045 и 1063 °С, что значительно выше температур, полученных при помощи амфиболовых термометров. Данный диапазон температур соответствует начальным условиям постмагматических преобразований.

Амфиболы в диорите разделились на эденит (рис. 2), магнезиальную роговую обманку и актинолит. Полученные по амфиболам РТ-параметры (табл. 2), по всей видимости, фиксируют метаморфические процессы.

Таким образом, температура кристаллизации диоритов принимается нами в диапазоне 1094–1192 °С; величину начального давления установить не удалось. Постмагматические изменения фиксируются при температуре 600–1063 °С, метаморфические изменения – в диапазоне 545–600 °С при давлении до 1,5–4,7 кбар, что также свидетельствует о перемещении раскристаллизованного материала к поверхности (до глубины 14 км и менее).

Следует отметить, что в массивах Платиноносного пояса Урала обнаруживаются очень разные, падающие по мере продвижения массивов к поверхности, давления и температуры [16, 17].

О возрасте интрузивных образований

В основе интерпретации результатов изотопно-геохронологического датирования интрузивных образований Щекуринского и Сёртыньинско-Щекуринского массивов лежат следующие геологические наблюдения: 1) полосчатые габбро тагилокытлымского комплекса прорываются массивными габбро северорудничного комплекса (правый борт р. Сёртынья, 800 м выше устья руч. Соляма, собственные данные); 2) диориты северорудничного комплекса прорывают все типы габброидов (по результатам геологической съемки масштаба 1:50000 (Б.Ф. Костюк, 1967) и геологического доизучения площади масштаба 1:50000 (М.М. Павлов, 1990)).

Из полосчатых габбро тагилокытлымского комплекса Щекуринского массива цирконы выделены из материала пробы 5 (рис. 4), отобранной из скальных обнажений в левом борту р. Сёртынья, амфиболы изучались в образцах 2, 4, 4–1 и 8 (рис. 1).

Большинство изученных цирконов имеют замкнутую U–Pb изотопную систему (рис. 5) с конкордантными (согласующимися) или субконкордантными возрастными (степень дискордантности от

5 до –5 %). В полосчатых габбро отчетливо проявляется датировка по цирконам 430 ± 5 млн лет (табл. 3), то есть ранний силур, конец лландовери. С ней практически совпадают две Ar–Ar датировки по амфиболу (рис. 6, А, Б). Возраст 430 млн лет можно было бы принять как магматический. Однако по характеру цирконов видно, что это так называемые секториальные цирконы (рис. 4), характерные для метаморфических преобразований [18, 19]. Таким образом, 430 млн лет – это, вероятно, возраст метаморфизма полосчатых габбро. Их магматический возраст фактически неизвестен, условно его можно считать $498 \pm 6,5$ млн лет по Ar–Ar датировке по амфиболу (рис. 6, Г).

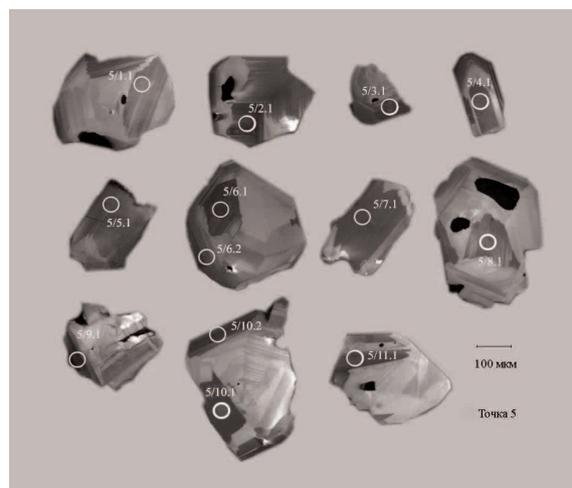


Рис. 4. Катодолюминесцентные изображения цирконов из полосчатых габбро тагилокытлымского комплекса Щекуринского массива

Fig. 4. Cathodoluminescent images of zircons from banded gabbro of tagilokytlymsk complex in Shchekurinskiy massif

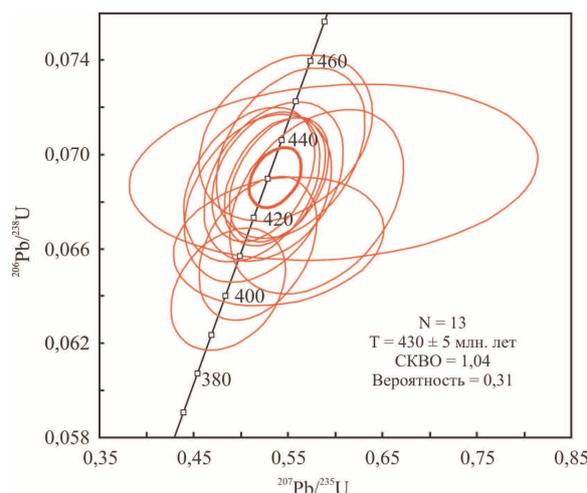


Рис. 5. U–Pb SHIMP-II изотопные данные для цирконов из полосчатых габбро тагилокытлымского комплекса Щекуринского массива

Fig. 5. U–Pb SHIMP-II isotopic data for zircons from banded gabbro of tagilokytlymsk complex in Shchekurinskiy massif

Таблица 3. U–Pb возраст цирконов из полосчатых габбро тагилектылымского комплекса Щекуринского массива

Table 3. U–Pb age of zircons from banded gabbro of tagiloktylymsk complex in Shchekurinskiy massif

Образец/ точка Sample/point	²⁰⁶ Pb _c %	Содержание, г/т Content, g/t			²³² Th ²³⁸ U	Возраст, млн лет (1) Age, million years (1)		D, %	Изотопные отношения (1) Isotopic ratio (1)							
		U	Th	²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb ²⁰⁶ Pb		²³⁸ U ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* ²³⁸ U	±%
5/1.1	0,00	46	25	2,7	0,56	425±9	418±129	-2	14,7	2,1	0,0551	5,8	0,518	6,2	0,0681	2,1
5/2.1	0,00	56	32	3,38	0,60	440±9	459±145	+4	14,1	2,0	0,0562	6,5	0,547	6,8	0,0707	2,0
5/3.1	0,00	118	41	6,95	0,36	429±7	471±83	+9	14,5	1,6	0,0565	3,8	0,536	4,1	0,0688	1,6
5/4.1	0,00	40	19	2,34	0,49	424±10	668±130	+38	14,7	2,3	0,0618	6,1	0,580	6,5	0,0680	2,3
5/5.1	-	71	38	4,23	0,56	432±9	696±311	+39	14,4	2,2	0,0627	14,6	0,598	14,7	0,0692	2,2
5/6.1	0,00	109	57	6,05	0,53	402±6	407±109	+1	15,6	1,6	0,0549	4,9	0,487	5,1	0,0643	1,6
5/6.2	0,00	94	32	5,59	0,35	430±7	413±87	-4	14,5	1,6	0,0550	3,9	0,524	4,2	0,0690	1,6
5/7.1	0,00	51	30	3,01	0,60	428±8	371±122	-16	14,6	1,9	0,0540	5,4	0,512	5,7	0,0687	1,9
5/8.1	0,00	51	27	3,03	0,54	429±8	466±117	+8	14,5	2,0	0,0563	5,3	0,535	5,7	0,0688	2,0
5/9.1	-	170	74	9,7	0,45	414±7	567±180	+28	15,1	1,7	0,0590	8,3	0,539	8,4	0,0663	1,7
5/10.1	0,00	52	27	3,1	0,53	436±9	499±120	+13	14,3	2,1	0,0572	5,4	0,553	5,8	0,0701	2,1
5/10.2	0,00	111	56	6,59	0,52	430±7	486±80	+12	14,5	1,6	0,0569	3,6	0,540	4,0	0,0689	1,6
5/11.1	0,00	55	32	3,12	0,61	412±7	485±101	+15	15,1	1,9	0,0568	4,6	0,517	4,9	0,0660	1,9

Примечание. Pb_c и Pb* – общий и радиогенный свинец. (1) – коррекция на нерадиогенный свинец по ²⁰⁴Pb. «-» – не обнаружено (содержание ниже порога чувствительности). Погрешности калибровки относительно стандартов 0,38 %.

Note: Pb_c and Pb* are the general and radiogenic lead. (1) is the nonradiogenic lead compensation by ²⁰⁴Pb. «-» not detected (content is below the sensitivity threshold). Calibration tolerance relative to the standards is 0,38 %.

Ar–Ar датировка 371 млн лет (поздний девон) (рис. 6, В): по всей видимости – это возраст коллизии Тагильской островной дуги с Русской платформой (что характерно для более южных районов Урала) [20].

Из кварцевых диоритов северорудничного комплекса Сёртыньинско–Щекуринского массива цирконы выделены из материала пробы 18 (рис. 7), отобранной из скальных обнажений в левом борту р. Сёртынья (рис. 1) – наша точка отбора совпадает с пробой № 25 из [21]. Амфиболы массивных габбро этого комплекса изучены в точке 14 (рис. 1). Полученные результаты показали следующее:

а) большинство изученных цирконов имеют замкнутую U–Pb изотопную систему (рис. 8) с конкордантными (согласующимися) или субконкордантными возрастными (степень дискордантности от 5 до -5 %);

б) две датировки по одному зерну циркона показали 1992–1994 млн лет (табл. 4). Очевидно, что это ксеногенный циркон, вероятно, из фундамента прилегающей с запада Русской платформы, попавший в зону субдукции под Платиноносным поясом Урала;

в) четыре датировки в диапазоне 620–650 млн лет получены по одному зерну циркона (табл. 4). Это также ксеногенное зерно. Вероятно, из мантии под приполярной частью Тагильской островной дуги;

г) два зерна циркона, по которым получен возраст 460–470 млн лет (табл. 4). Исходя из строения зёрен (рис. 7), наличие тонкой ритмической зональности – это магматические цирконы, и они дают магматический возраст диоритов: конец среднего – начало позднего ордовика. Кроме того, этот возраст совпадает с возможно магматическим Ar–Ar (по амфиболу) возрастом массивных габбро (рис. 6, Д).

Таблица 4. U–Pb возраст цирконов из кварцевых диоритов северорудничного комплекса Сёртыньинско–Щекуринского массива

Table 4. U–Pb age of zircons from quartz diorites of the Sertynyinskoy-Shchekurinskiy complex

Образец/ точка Sample/point	²⁰⁶ Pb _c %	Содержание, г/т Content, g/t			²³² Th ²³⁸ U	Возраст, млн лет (1) Age, million years (1)		D, %	Изотопные отношения (1) Isotopic ratios (1)							
		U	Th	²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb ²⁰⁶ Pb		²³⁸ U ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* ²³⁸ U	±%
18/1.1	0,00	28	11	1,83	0,40	471±13	617±205	+24	13,2	2,9	0,0604	9,5	0,63	9,9	0,076	2,9
18/1.2	0,00	115	66	7,48	0,59	469±8	513±105	+9	13,2	1,8	0,0576	4,8	0,60	5,1	0,076	1,8
18/2.1	0,00	68	38	4,31	0,58	461±10	549±132	+17	13,5	2,1	0,0585	6,0	0,60	6,4	0,074	2,1
18/2.2	0,00	48	13	3,09	0,27	465±11	458±173	-1	13,4	2,5	0,0561	7,8	0,58	8,2	0,075	2,5
18/3.1	0,00	71	25	22,1	0,36	1994±37	1993±34	-0	2,8	2,1	0,1225	1,9	6,12	2,9	0,363	2,1
18/3.2	0,35	48	10	14,9	0,22	1992±44	1968±64	-1	2,8	2,5	0,1208	3,6	6,03	4,4	0,362	2,5
18/4.1	0,00	110	50	9,92	0,48	646±11	811±79	+21	9,5	1,8	0,0661	3,8	0,96	4,2	0,105	1,8
18/4.2	1,04	66	44	6,06	0,69	650±15	756±308	+15	9,4	2,5	0,0644	14,6	0,94	14,8	0,106	2,5
18/4.3	0,00	361	136	32,9	0,39	650±8	670±46	+3	9,4	1,4	0,0619	2,2	0,91	2,6	0,106	1,4
18/4.4	-	182	57	15,8	0,33	620±10	899±135	+32	9,9	1,7	0,0690	6,6	0,96	6,8	0,101	1,7

Примечание: Pb_c и Pb* – общий и радиогенный свинец. (1) – коррекция на нерадиогенный свинец по ²⁰⁴Pb. «-» – не обнаружено (содержание ниже порога чувствительности). Погрешности калибровки относительно стандартов 0,38 %.

Note: Pb_c and Pb* are the general and radiogenic lead. (1) is the nonradiogenic lead compensation by ²⁰⁴Pb. «-» not detected (content is below the sensitivity threshold). Calibration tolerance relative to the standards is 0,38 %.

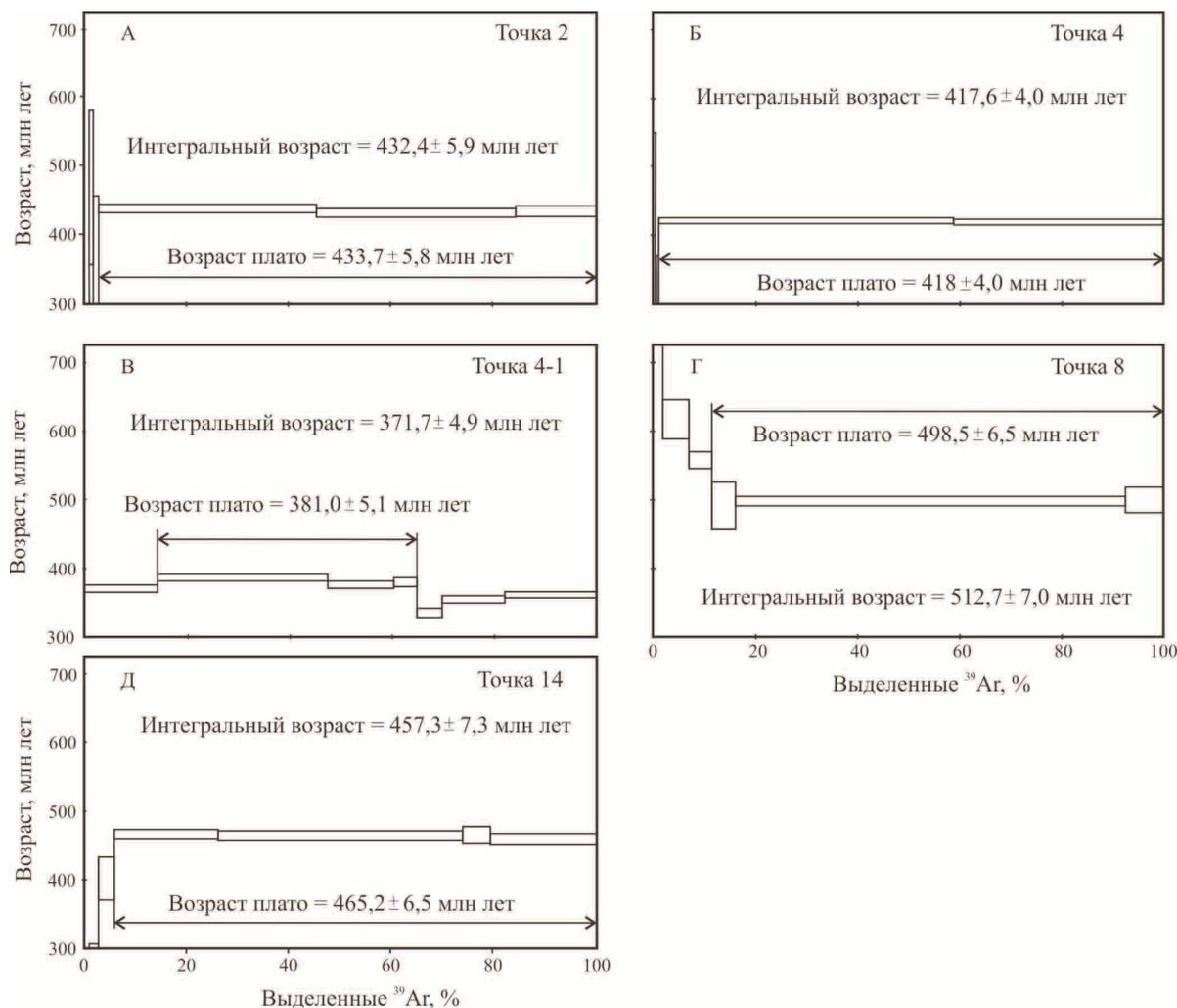


Рис. 6. Результаты Ar–Ar датирования габброидов Щекуринского массива по породообразующему амфиболу: А–Г – полосчатые габбро тагилотылымского комплекса; Д – массивные габбро северорудничного комплекса. Нумерация образцов в соответствии с рис. 1

Fig. 6. Results of Ar–Ar dating of gabbro in Shchekurinskiy massif by the rock-forming amphibole: А–Г are the banded gabbro of tagiloktylymsk complex; Д is the massive gabbro of north-mining complex. Sample numbers correspond to Fig. 1

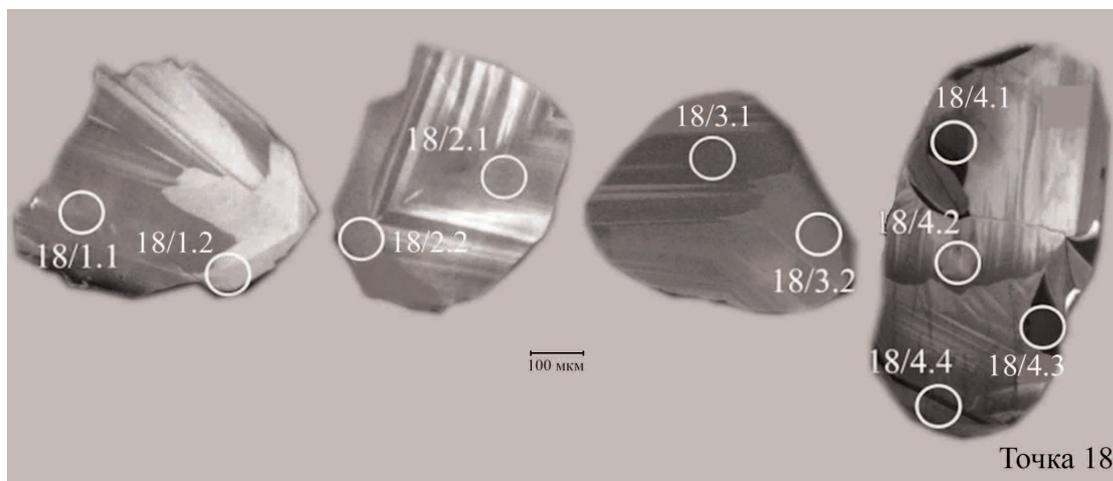


Рис. 7. Катодолуминесцентные изображения цирконов из кварцевых диоритов северорудничного комплекса Сёртыньинско-Щекуринского массива

Fig. 7. Cathodoluminescent images of zircons from quartz diorites of north-mining complex in Sertyninskiy-Shchekurinskiy massif

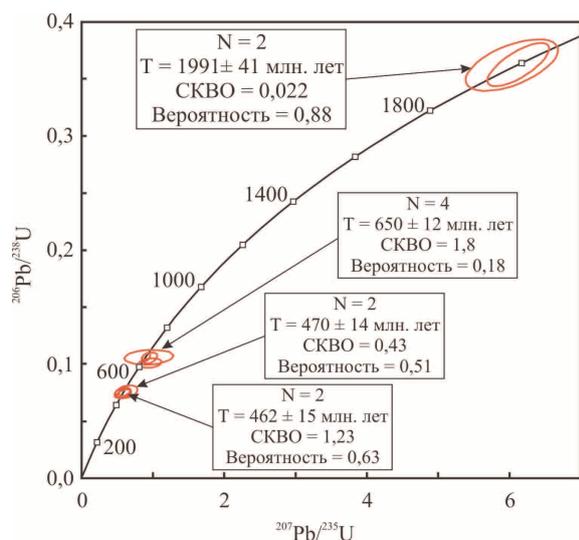


Рис. 8. *U-Pb SHIMP-II изотопные данные для цирконов из кварцевых диоритов северорудничного комплекса Сёртыньинско-Щекуринского массива*

Fig. 8. *U-Pb SHIMP-II isotopic data for zircons from quartz diorites of north-mining complex in Sertyninsk-Shchekuryinsk massif*

Обсуждение результатов и выводы

Прежде всего, следует отметить, что приводимые минералогические и изотопно-геохимические характеристики пород Щекуринского и Сёртыньинско-Щекуринского массивов получены для описываемой территории впервые.

По результатам работ можно сформулировать следующее.

1. Полученные датировки интрузивных пород Щекуринского и Сёртыньинско-Щекуринского массивов демонстрируют значительно более ранние возраста изученных объектов, чем это предполагалось ранее:

а) самыми древними из изученных породных ассоциаций являются полосчатые габбро Щекуринского массива, относящиеся к тагилокытлымскому комплексу. Их возраст условно принят в $498 \pm 6,5$ млн лет по $Ag-Ag$ датировке по амфиболу. По всей видимости, принятый возраст не в полной мере отражает время внедрения габброидов: геотемпературные характеристики свидетельствуют о временном разрыве между внедрением расплава и началом кристаллизации амфиболов. То есть время внедрения может превышать 500 млн лет. В связи с этим уместно упомянуть о $Sm-Nd$ изохронном возрасте габбро, габброноритов и амфиболовых габбро платиноносной ассоциации Хорасюрского массива [2]: приводимая авторами датировка 565 ± 50 млн лет в верхнем пределе весьма близка к значениям, полученным в настоящей работе.

На сегодняшний день возраст габброидов тагилокытлымского комплекса на восточном склоне Приполярного Урала считается раннесилурийским, что принято по результатам геологических наблюдений и корреляции с аналогичными образованиями в других районах.

б) немногочисленные предварительные результаты датирования цирконов кварцевых диоритов второй фазы становления северорудничного комплекса показали, тем не менее, значительные вариации данных, образуя три возрастные группы в диапазоне 460–1990 млн лет.

Следует отметить, что сложный характер $U-Pb$ возрастов цирконов установлен и для плагиогранитов третьей фазы верхнетагильского (северорудничного) комплекса, опробованных на расположенной южнее Хорасюрской площади [2], что, по мнению авторов, указывает на сложную и дискуссионную геологическую историю изучаемых объектов.

Полученный магматический возраст цирконов кварцевых диоритов Сёртыньинско-Щекуринского массива (461–471 млн лет) практически совпадает с одним из возрастных кластеров цирконов плагиогранитов Хорасюрской площади (465–485 млн лет).

Таким образом, полученные нами неожиданные и отчасти даже «парадоксальные» возраста магматических пород междуречья Сёртынья-Щекурья не являются какой-то локальной аномалией, а подтверждаются и данными по другим районам Платиноносного пояса Урала. Думается, что точку в исследованиях пока ставить рано и изучение необходимо продолжить, тем более что для всего огромного, протяжённостью 1000 км, Платиноносного пояса фактически получены лишь первые современные изотопно-геохронометрические данные. Результаты абсолютного датирования комплексов магматических пород Платиноносного пояса Урала пока не привели к однозначным выводам [22, 23]. Понятно, что преобладающие датировки, соответствующие диапазону 415–430 млн лет, фиксируемые преимущественно в габброноритах и гранитоидах, отражают время завершения формирования островной дуги, конечной (силурийской) стадии её развития. А ведь островная дуга должна была существовать не «одномоментно», а, вероятно, достаточно протяжённый отрезок времени. Сколько эта дуга существовала до этого, достоверно пока неизвестно, чем, по всей видимости, и объясняется часть «древних» (по крайней мере, ордовикских) датировок.

2. Полученные данные по $Pb-U$ условиям формирования пород основного состава Щекуринского массива косвенно подтверждают генетическое различие ранее выделенных двух типов габброидов [6]: полосчатые габбро тагилокытлымского комплекса характеризуются более низкими температурами кристаллизации ($750-854$ °C) по сравнению с массивными габбро ($923-1016$ °C) и диоритами северорудничного комплекса ($1094-1192$ °C). По всей видимости, этот факт отражает магмогенез на разных глубинах.

Работы выполняются в Научно-образовательном центре «Поиск» Югорского государственного университета в рамках государственных работ в сфере научной деятельности (задание № 2014/505) и в рамках Программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны РФ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов К.С., Берзин С.В., Ерохин Ю.В. Первые данные об U-Pb возрасте цирконов из реликтовых зон спрединга на Среднем Урале // Доклады АН. – 2012. – Т. 443. – № 1. – С. 78–83.
2. Ронкин Ю.Л., Иванов К.С., Лепихина О.П. Возрастная и генетическая идентификация пород Хорасюрского массива: Sm-Nd ID-TIMS и U-Pb SHRIMP-II ограничения // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2012. – № 2. – С. 6–10.
3. Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. О корректности «некорректности» изотопной геологии Хорасюрского массива, Приполярный Урал // Уральский геологический журнал. – 2013. – № 5. – С. 81–94.
4. Williams I.S. Application in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // Reviews in Economic Geology. – 1998. – V. 7. – P. 1–35.
5. Stacey S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. – 1975. – V. 26. – P. 207–221.
6. Кудрин К.Ю. Геохимическая типизация магматических образований восточного склона Приполярного Урала междуречья Сёртынья-Манья // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 69–82.
7. Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала / А.Н. Мельгунов, В.П. Водолазская, А.В. Жданов и др. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – 273 с.
8. Mercier J.-C.C. Single-pyroxene thermobarometry // Tectonophysics. – 1980. – V. 70. – P. 1–37.
9. Hammarstrom J.M., Zen E. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. – 1986. – V. 71. – P. 1297–1313.
10. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons / L.S. Hollister, G.C. Grisson, E.K. Peters, H.H. Stowell, V.B. Sisson // American Mineralogist. – 1987. – V. 72. – P. 231–239.
11. Otten M.T. The origin of brown hornblende in the Artfjället gabbro and dolerites // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – V. 86. – P. 189–199.
12. Anderson D.J., Lindsley D.H. New (and final!) models for the Ti-magnetite-ilmenite geothermometer and oxygen barometer // EOS Transactions. – 1985. – V. 66. – P. 416.
13. Lepage L.D. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry // Computers and Geosciences. – 2003. – V. 29. – P. 673–678.
14. Бочкарев В.В. Магматические формации северной части Приполярного Урала. Препринт. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 67 с.
15. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the international mineralogical association's 1997 recommendations / V.E. Leake, A.R. Woolley, W.D. Birch et al. // Canad. Miner. – 2003. – V. 41. – P. 1355–1362.
16. Иванов К.С. Генезис хром-платинового оруденения Уральского (Нижнетагильского) типа // Доклады АН. – 2011. – Т. 441. – № 2. – С. 224–226.
17. Шмелев В.П. Структура и петрология Хорасюрского габбро-гипербазитового массива, Приполярный Урал // Петрология. – 1994. – Т. 2. – № 5. – С. 495–510.
18. Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. – 144 с.
19. Atlas of Zircon textures / F. Corfu, J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin, P. Kinny // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2003. – V. 531. – P. 469–500.
20. Иванов К.С. Оценка палеоскоростей субдукции и коллизии при формировании Урала // Доклады АН. – 2001. – Т. 377. – № 2. – С. 231–235.
21. Шмелев В.П. Магматические комплексы зоны Главного Уральского разлома (Приполярный сектор) в свете новых геохимических данных // Литосфера. – 2005. – № 2. – С. 41–59.
22. Структурно-вещественная эволюция комплексов Платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа / Ю.А. Волченко, К.С. Иванов, В.А. Коротеев, Т. Оже // Литосфера. – 2007. – № 3. – С. 3–27.
23. Иванов К.С., Волченко Ю.А. О некоторых дискуссионных вопросах изучения геологии Платиноносного пояса Урала // Уральский геологический журнал. – 2009. – № 3. – С. 67–98.

Поступила 05.12.2014.

UDC 552.11 (470.5)

THE RESULTS OF U-PB SHRIMP-II AND AR-AR DATING OF MAGMATIC FORMATIONS IN SERTYNYA-SHEKURYA INTERFLUVE (PREPOLAR URALS)

Konstantin Yu. Kudrin,

Yugra State University, 16, Chekhova street, Khanty-Mansiysk, Russia, 628011. E-mail: kudringeo@inbox.ru

Kirill S. Ivanov,

Institute of Geology and Geochemistry, 7, Pochtovy lane, Yekaterinburg, Russia, 620075. E-mail: ivanovks55@ya.ru

Sergey P. Shokalskiy,

Russian Geological Research Institute (VSEGEI), 74, Sredniy avenue, St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: Sergey_Shokalskiy@vsegei.ru

Ekaterina V. Nastavko,

JSC «Kuzbassgiproshahnt», 34, Ostrovskogo street, Kemerovo, Russia, 650610. E-mail: evnastavko@ya.ru

The relevance of work. In recent years much attention is paid to the problem of age identification of intrusive formations of the Eastern slope of the Middle, Northern and Prepolar Urals due to the absence of inclosing stratigraphic formations with reliable paleontological characteristics in their surroundings. The obtained results are often much more ancient than it was believed. This fact has initiated a revision of ideas about the evolution of magmatism of this area.

The main aim of the study is to refine the territory magmatism schemes on the basis of geological observations complex and the results of the analytical research.

The methods used in the study. Mineralogical studies are being carried out with scanning electron microscope JSM-6510LV (Jeol Ltd) with energy-dispersive spectrometer INCAEnergy 350 detector-X-Max-80 (Oxford Instruments Analytical Ltd) at accelerating voltage of 20 kV, electron beam current of 0,3 to 0,5 at a time when the set of spectra 10 (Novosibirsk, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, analyst N.S. Karmanov). Absolute age is defined by Ar-Ar method on rock-forming amphiboles of the gabbro and diorite (Novosibirsk, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, analyst A.V. Travin). U-Pb local dating of zircons from gabbro and diorite was performed using secondary ion microprobe of high resolution SHRIMP-II (TION, VSEGEI) according to the method described by Williams I.S. (1998). Nonradiogenic lead compensation was carried out by the measured ^{204}Pb and modern lead isotopic composition in Stacey-Kramer model.

The results. The authors have studied and dated gabbro and diorite, forming the major structural-material units on the Eastern slope of the Prepolar Urals – Shchekurinskiy and Sertyninsko-Shchekurinskiy massifs. The majority of the studied zircons have a closed U-Pb isotopic system with concordant (consistent) or subconcordant ages (degree of discordantly from 5 to -5 %). The received dates demonstrate a significantly earlier age of the studied objects than it was believed: the magmatic age of the gabbro of tagiloktylymskiy complex in structure of Shchekurinskiy massif was accepted $498 \pm 6,5$ million years for Ar-Ar dating on amphibole, gabbro of severorudnichnyy complex was accepted $465,2 \pm 6,5$ million years for Ar-Ar dating on amphibole, diorites of Sertyninsko-Shchekurinskiy massif were accepted 461–471 million years by U-Pb dating on zircon. It is supposed that: 1) the «young» (430 ± 5 mA) zircons indicate the time of metamorphism of gabbros tagiloktylymskiy complex; 2) the «ancient» (1992–1994 and 620–650 mA) zircons of diorites of severorudnichnyy complex are xenogenic and they indicate events under Tagil island-arc terrane in the basement of the adjacent to the West of the platform, got in a subduction zone, and events in the upper mantle respectively. The determined RT-parameters of intrusive rocks formation indicate the time lag between the introduction of the melt and the beginning of crystallization of amphiboles that indicates the earlier age of intrusions than that which the authors accepted according to the results of Ar-Ar dating.

Key words:

Prepolar Urals, paleoarc sector, magmatism, absolute age, zircon, uranium-lead dating, amphiboles, argon-argon dating.

The investigations are carried out in the Scientific educational center «Poisk» of Yugra State University within the State works in scientific field (task no. 2014/505) and within the Program of the Presidium of the RAS «Exploratory fundamental scientific research for the benefit of development of the RF Arctic zone».

REFERENCES

1. Ivanov K.S., Berzin S.V., Erokhin Yu.V. Pervye dannye ob U-Pb vozraste tsirkonov iz reliktovykh zon speredinga na Srednem Urale [The first data about U-Pb age of zircons from relic spreading zones in the Middle Urals]. *Doklady Akademii Nauk – Doklady earth sciences*, 2012, vol. 443, no. 1, pp. 78–83.
2. Ronkin Yu.L., Ivanov K.S., Lepikhina O.P. Vozrastnaya i geneticheskaya identifikatsiya porod Khorasyurskogo massiva: Sm-Nd ID-TIMS i U-Pb SHRIMP-II ogranicheniy [The age and genetic identification of the Khorasyur massif rocks: Sm-Nd ID-TIMS & U-Pb SHRIMP-II constrains]. *Vestnik instituta geologii Komi NTS UrO RAN*, 2012, no. 2, pp. 6–10.
3. Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P. O korrektnosti «nekorrektnosti» izotopnoy geologii Khorasyurskogo massiva, Pripolyarnyy Ural [About the correctness of «incorrectness» of isotope geology of the Khorasyur massif, Prepolar Urals]. *Ural'skiy geologicheskii zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 81–94.
4. Williams I.S. Application in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Reviews in Economic Geology*, 1998, vol. 7, pp. 1–35.

5. Stacey S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, vol. 26, pp. 207–221.
6. Kudrin K.Yu. Geokhimicheskaya tipizatsiya magmaticheskikh obrazovaniy vostochnogo sklona Pripolyarnogo Urala mezhdurechya Sertynya–Manya [Geochemical classification of magmatic formations of the Prepolar Urals eastern slope in Sertynya–Manya interfluve]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 69–82.
7. Melgunov A.N., Vodolazskaya V.P., Zhdanov A.V. *Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i mineralno-syrevooy potentsial Severnogo, Pripolyarnogo i Polyarnogo Urala* [The main features of geological structure and mineral and raw material potential of the Northern, Prepolar and Polar Urals]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2010. 273 p.
8. Mercier J.-C.C. Single-pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, 1980, vol. 70, pp. 1–37.
9. Hammarstrom J.M., Zen E. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 1986, vol. 71, pp. 1297–1313.
10. Hollister L.S., Grisson G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 1987, vol. 72, pp. 231–239.
11. Otten M.T. The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, vol. 86, pp. 189–199.
12. Anderson D.J., Lindsley D.H. New (and final!) models for the Ti–magnetite–ilmenite geothermometer and oxygen barometer. *EOS Transactions*, 1985, vol. 66, p. 416.
13. Lepage L.D. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite–magnetite geothermometry and geobarometry. *Computers and Geosciences*, 2003, vol. 29, pp. 673–678.
14. Bochkarev V.V. *Magmaticheskije formatsii severnoy chasti Pripolyarnogo Urala* [Magmatic formations of the Northern Subpolar Urals]. Sverdlovsk, UB USSR, 1990. 67 p.
15. Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the international mineralogical association's 1997 recommendations. *Canad. Miner.*, 2003, vol. 41, pp. 1355–1362.
16. Ivanov K.S. Geneziz khrom-platinovogo orudneniya Uralskogo (Nizhnetagil'skogo) tipa [Genesis chromium-platinum mineralization of the Urals (Nizhny Tagil) type]. *Doklady Akademii Nauk – Doklady earth sciences*, 2011, vol. 441, no. 2, pp. 224–226.
17. Shmelev V.R. Struktura i petrologiya Khorasyurskogo gabbro-giperbazitovogo massiva, Pripolyarnyy Ural [Structure and petrology of the Khorasyur gabbro-ultrabasite massif, Prepolar Urals]. *Petrologiya – Petrology*, 1994, vol. 2, no 5, p. 495–510.
18. Kaulina T.V. *Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimorficheskikh kompleksakh* [The zircon formation and transformation in polymetamorphic complexes]. Apatity, KSC of RAS, 2010. 144 p.
19. Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. Atlas of Zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, vol. 53, pp. 469–500.
20. Ivanov K.S. Otsenka paleoskorostey subduktzii i kollizii pri formirovaniy Urala [Assessment paleovelocity of subduction and collision in the formation of the Urals]. *Doklady Akademii Nauk – Doklady earth sciences*, 2001, vol. 377, no. 2, pp. 231–235.
21. Shmelev V.R. Magmaticheskije kompleksey zony Glavnogo Uralskogo razloma (Pripolyarnyy sektor) v svete novykh geokhimicheskikh dannykh [Magmatic complexes of the Main Urals Fault zone (Prepolar sector) in light of new geochemical data]. *Litosfera – Lithosphere*, 2005, no. 2, pp. 41–59.
22. Volchenko Yu.A., Ivanov K.S., Koroteev V.A., Ozhe T. Strukturno-veshchestvennaya evolyutsiya kompleksov Platinonosnogo poyasa Urala pri formirovaniy khromit-platinovykh mestorozhdeniy uralskogo tipa [Structural-substantial evolution of the Urals Platiniferous belt's complexes in the time of Uralian type chromite-platinum deposits formations]. *Litosfera – Lithosphere*, 2007, no. 3, pp. 3–27.
23. Ivanov K.S., Volchenko Yu.A. O nekotorykh diskussionnykh voprosakh izucheniya geologii Platinonosnogo poyasa Urala [Some discussion issues of exploring the Geology of the Urals Platiniferous belt]. *Uralskiy geologicheskii zhurnal*, 2009, no. 3, pp. 67–98.

Received: 05 December 2014.

УДК 621.311.24

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКЕ

Голдаев Сергей Васильевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: SVGoldaev@tpu.ru.

Радюк Карина Нуржановна,

аспирант кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института, ассистент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: radyuk@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена несовершенством существующих методик прогнозирования характеристик ветроэнергетических установок.

Цель исследования: совершенствование существующей методики расчета производительности ветроэнергетической установки большой мощности, проведение параметрического анализа, сравнение полученных результатов с приведенными ранее другими авторами.

Методы. В усовершенствованной методике расчета с помощью критерия Пирсона проводится проверка статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко. Параметры распределения находятся путем численного решения трансцендентного уравнения с определением значений гамма-функции по интерполяционной формуле. Значения рабочей характеристики неполной гамма-функции определены численным интегрированием по формуле Уэддла. Методика автоматизирована на Турбо Паскале.

Результаты. Представлены результаты расчета характеристик ветроэнергетической установки, полученных на основе усовершенствования участков методики, касающихся проверки с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко, точного вычисления значений гамма-функции и неполной гамма-функции. Сравнение результатов расчета по предлагаемой методике с полученными другими авторами выявило существенные различия в значениях выборочной дисперсии и эмпирического критерия Пирсона. Проведен анализ влияния на производительность ветроэнергетических установок начальной и максимальной скорости ветра.

Выводы. Функция Вейбулла–Гнеденко может быть использована для описания характеристик ветра в пунктах с умеренными и сильными ветрами. Варьирование скорости ветра в диапазоне возможных скоростей не влияет на среднее значение рабочей характеристики и производительности ветроэнергетических установок. Повышение максимальной скорости ветра приводит к значительному увеличению данных параметров. Усовершенствованная методика расчета производительности ветроэнергетических установок большой мощности может быть использована в проектных организациях и учебном процессе.

Ключевые слова:

Ветроэнергетическая установка, скорость ветра, стандартная высота флюгера, электрическая мощность, средняя производительность, рабочая характеристика, выборочная дисперсия, функция распределения Вейбулла–Гнеденко, плотность воздуха, критерий согласия Пирсона, гамма-функция.

Введение

Повышение цен на органическое топливо, освоение северных и арктических регионов, интенсификация сельскохозяйственного производства, развитие индивидуального строительства стимулируют использование в системах тепло- и электроснабжения небольших объектов возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1–3].

Все большее распространение получают автономные гибридные системы электро- и теплоснабжения. Так, в работе [4] описан опыт создания и эксплуатации энергоэффективных зданий в г. Барнауле, электроснабжение одного из них осуществляется гибридной системой, использующей в качестве источников электроэнергии ветроэлектрический агрегат, фотоэлектрическую установку и две дизель-электрические установки.

В России, согласно государственной программе «Энергоэффективность и развитие энергетики», доля ветроэлектростанций на 2020 г. должна составить 61 % от общего числа энергоустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии (солнечные электростанции – 26 %, малые гидроэлектростанции – 13 %). Установленная мощность вводимых ветроэлектростанций за период с 2015–2020 гг. должна увеличиться с 250 до 1000 МВт [5].

Как отмечено в работе [6], успешное развитие ветроэнергетики зависит от решения трех основных проблем: выявления энергетической ценности ветра в рассматриваемом регионе и наиболее благоприятных мест для установки ВЭУ, создания высокоэффективных ВЭУ, определения их функций в энергетике региона.

Для выбора наиболее эффективной по своим энергетическим параметрам ВЭУ, удовлетворяющей требованиям надежности, необходимо учитывать особенности окружающей местности, время года [7]. Влияние отмеченных факторов следует проанализировать на стадии проектирования, применяя методику прогнозирования производительности ВЭУ.

Существующие методики расчета производительности ВЭУ преимущественно используют функцию распределения Вейбулла–Гнеденко для аппроксимации результатов измерений скорости ветра. В работе [8] рассмотрена достаточно простая методика расчета производительности ВЭУ, однако не сказано, каким образом она была реализована, хотя в ней использовались специальные функции, трансцендентные уравнения.

В публикации [9] описана автоматизированная методика рационального выбора ВЭУ малой мощности для систем автономного электроснабжения, позволяющая удовлетворить потребителя по отношению цена/качество. В ней отсутствует блок проверки статистической гипотезы о применимости распределения Вейбулла–Гнеденко, поэтому для расчета параметров k и c не привлекается трансцендентное уравнение, содержащее гамма-функцию.

Методика расчета

Опишем вариант усовершенствованной методики расчета производительности ВЭУ [8], в которой привлечены численные методы и их автоматизация на Турбо Паскале, осуществлено сравнение полученных результатов с приведенными в [8].

В зависимости от скорости ветра U , электрическая мощность, вырабатываемая ВЭУ с номинальной мощностью, равна:

$$N(U) = N_{nm} \varphi(U). \quad (1)$$

Входящий в выражение (1) сомножитель $\varphi(U)$ называется рабочей характеристикой ВЭУ. Для установок с постоянной частотой вращения ветроколеса в номинальном режиме применима аппроксимация:

$$\varphi(U) = \begin{cases} 0, & U < U_0 \\ (U / U_0^3), & U_0 < U \leq U_{nm} \\ 1, & U_{nm} < U \leq U_{mx} \\ 0, & U > U_{mx}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь U_0 – начальная скорость, при которой ветроколесо приводится во вращение; U_{nm} – номинальная скорость ВЭУ; U_{mx} – максимальная скорость, при которой ВЭУ выводится из рабочего режима. Например, в работе [10] использовалась ВЭУ Wincon-200. Среднегодовая скорость ветра на площадке на высоте оси ветроколеса ВЭУ составляла около 6,0 м/с. При достижении U_0 значения 4,5 м/с и сохранении этой скорости в течение более минуты управляющий контролер подавал сигнал на пуск ВЭУ. Максимальная мощность уста-

новки достигалась при скорости ветра 14 м/с. Когда $U_{mx} > 25$ м/с ВЭУ автоматически останавливалась во избежание поломки. Если скорость ветра была ниже 20 м/с снова происходил пуск ВЭУ.

Экспериментальные данные по U , входящей в (2), обобщены с использованием функции распределения Вейбулла–Гнеденко [7, 11], предложенной для описания отказов механических систем в начальный период эксплуатации, расчета их долговечности [12, 13]:

$$F(U) = 1 - \exp[-(U / c)^k], \quad (3)$$

где k – параметр формы, а c – параметр, близкий к средней скорости ветра U_c , значение которой можно найти по формуле:

$$U_c = c \Gamma(1 + 1 / k). \quad (4)$$

В работе [6] приведена аппроксимационная зависимость для $F(U)$, предложенная Г.А. Гриневичем, которая содержит четыре параметра.

Средняя удельная мощность ветрового потока (мощность, отнесенная к единице площади ветроколеса):

$$P_{0c} = 0,5 \rho c^3 \Gamma(1 + 3 / k), \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, равная 1,2 кг/м³; $\Gamma(x)$ – гамма-функция [14], определяемая так:

$$\tilde{A}(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt.$$

С целью обеспечения реализации описанного алгоритма на Турбо Паскале для вычисления $\Gamma(x)$ выбрано интерполяционное выражение, имеющее погрешность менее 10^{-4} при значениях $x < 60$ [14]:

$$\tilde{A}(x) \cong \frac{\sqrt{(2\pi / y)} \exp\{y[\ln(y) - 1] + 1 / (12y)\}}{x(x+1)(x+2)(x+3)(x+4)(x+5)},$$

где $y = x + 6$.

Такой подход был использован в ходе автоматизации расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла–Гнеденко [15].

Номинальная мощность выбранной ВЭУ должна примерно соответствовать значению:

$$P_{nm} \approx \eta_p \eta_g C_p S P_{0c}, \quad (6)$$

где S – площадь ветроколеса; $\eta_p = 0,9$ – КПД ротора ветроколеса; $\eta_g = 0,95$ – КПД электрогенератора; $C_p = 0,45$ – коэффициент мощности, учитывающей долю получаемой ветродвигателем мощности ветрового потока, найденной по формуле (5).

Метеослужбы регистрируют параметры ветра на стандартной высоте флюгера $h_f = 10$ м. Оси ветроколес современных ВЭУ находятся на высоте от 10 до 100 м [7, 8]. Для определения средней скорости ветра на этих высотах часто используется приближенная формула [7]:

$$U_{hc} = U_{fc} (h / h_f)^b, \quad (7)$$

где U_{fc} – средняя скорость ветра на высоте флюгера; параметр $b = 1/7 = 0,143$ для открытых мест.

Как отмечено в [7], значения b различны в разное время года и даже в течение одного дня, поэтому формулой (7) следует пользоваться очень осмотрительно, особенно для высот $z > 50$ м.

Средняя производительность ВЭУ за период времени T составляет:

$$W_c = \varphi_c N_{nm} T, \quad (8)$$

где φ_c – среднее значение рабочей характеристики, имеющей смысл коэффициента располагаемой мощности ВЭУ [8]. При использовании функции распределения (3):

$$\varphi_c = (c / U_{nm})^3 [\gamma(a, U_{nm}) - \gamma(a, U_0)] + \exp[-(U_{nm} / c)^3] - \exp[-(U_{mx} / c)^3]. \quad (9)$$

Здесь $a = 1 + 3/k$, $\gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция [12], представляющая определенный интеграл:

$$\gamma(a, x) = \int_0^x \exp(-t) t^{a-1} dt.$$

Для нахождения значений $\gamma(a, x)$ в настоящей работе применялся численный метод интегрирования по формуле Уэддла, обеспечивающий высокую точность [16]. При этом использовалось только семь значений подынтегральной функции [17]. Тестирование выбранного алгоритма путем сравнения определенных значений $\gamma(a, x)$ с табличными подтвердило его эффективность.

Таким образом, расчет производительности ВЭУ сводится к определению по формуле (9) φ_c , т. е. к статистической оценке параметров функции Вейбулла–Гнеденко k и c при заданных скоростях U_0 , U_{nm} и U_{mx} выбранной ВЭУ.

Результаты многолетних измерений скорости ветра в данной местности для каждого месяца и в целом за год приводятся в виде таблиц, в которых для каждого интервала, на которые разбит весь промежуток изменения U , даются относительные частоты попадания скорости в данный интервал, выраженные в процентах.

Методика обработки статистических данных

Опишем участок алгоритма, в котором излагается методика обработки статистических данных [8]. Обозначим n число измерений скорости ветра за данный период, принимаемое равным 100, что является средним за много лет наблюдений; m – число интервалов для скорости ветра; U_{li} и U_{2i} – левая и правая границы i -го интервала; U_{ci} – середина i -го интервала; n_i – частота попадания скорости ветра в i -й интервал; $w_i = n_i/n$ – относительная частота.

Выборочные средняя скорость ветра и дисперсия вычисляются по известным формулам [8, 12]:

$$U_{bc} = \sum_{i=1}^m w_i U_i, \quad D_b = \sum_{i=1}^m w_i (U_i - U_{bc})^2. \quad (10)$$

Приравняв U_{bc} и D_b из (10) математическому ожиданию и дисперсии распределения Вейбул-

ла–Гнеденко, получено трансцендентное уравнение относительно параметра k [8]:

$$f(k) = \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) / \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) - \frac{D_b}{U_{bc}^2} - 1 = 0. \quad (11)$$

Решение его было осуществлено методом бисекции. Затем по формуле (4) вычислялся параметр c :

$$c = U_{bc} / \tilde{A}\left(1 + \frac{1}{k}\right). \quad (12)$$

Далее с помощью критерия согласия Пирсона выполнялась проверка гипотезы о том, что использованные результаты измерения скорости ветра согласуются с функцией распределения Вейбулла–Гнеденко.

Наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона вычисляется так [12]:

$$\chi_n^2 = n \sum_{i=1}^m (w_i - p_i)^2 / p_i, \quad (13)$$

где p_i – вероятность попадания скорости ветра в i -й интервал [8, 18]:

$$p_i = \begin{cases} F(U_{2i}) - F(U_{1i}), & i = 1, 2, \dots, m-1 \\ 1 - F(U_{1i}), & i = m. \end{cases} \quad (14)$$

При использовании критерия Пирсона число степеней свободы подсчитывается по формуле $k_c = s - 1 - r$, где s – число разрядов; r – число параметров, оцениваемых по выборке [12].

Для обеспечения автоматизации проверки гипотезы в работе [19] вместо табличных значений критических точек [12] распределения χ_p^2 была использована упрощенная аппроксимация Корниша–Фишера, обладающая достаточной точностью и справедливая для произвольного значения числа степеней свободы [19]:

$$\chi_p^2(k) = k + u_p \sqrt{2k} + \frac{2u_p(u_p - 1)}{3} + \frac{u_p(u_p - 7)}{9\sqrt{2k}}. \quad (15)$$

Квантиль уровня стандартного нормального распределения u_p , входящий в (15), находился по следующей формуле [20]:

$$u_p = 4,91[(1 - p)^{0,14} - p^{0,14}], \quad (16)$$

с относительной погрешностью менее 0,03 %.

Если в ходе расчета эмпирическое значение χ_n^2 , вычисленное по формулам (13) и (14), оказывается меньше теоретического значения χ_p^2 , то считается подтвержденной выдвинутая гипотеза.

Результаты расчетов. Выводы

Тестирование программы на Турбо Паскале проверки гипотезы о распределении Вейбулла–Гнеденко по критерию Пирсона осуществлялось решением примеров, рассмотренных в пособии [12].

В табл. 1 приведены результаты расчетов параметров: U_{bc} , D_b , c , χ_n^2 и χ_p^2 по формулам (10), (12), (13) и (15), k – из уравнения (11), (вторая строка) и представленные в работе [8] (третья строка).

Таблица 1. Результаты расчетов

Table 1. Results of calculation

U_{bc}	D_b	k	c	χ_n^2	χ_p^2
10,452	59,09	1,38	11,442	7,73	26,09
10,453	43,63	1,62	11,672	2,57	26,22

Различие в значениях D_b и χ_n^2 обусловлено, вероятно, небрежностью проведения расчетов, допущенной в работе [8]. При $D_b=59,09$ из решения трансцендентного уравнения (11) получено значение $k=1,38$. Несущественное отличие в значениях χ_p^2 подтверждает применимость аппроксимаций (15) и (16).

Поскольку $\chi_n^2 < \chi_p^2$, то функция Вейбулла–Гнеденко может быть использована для описания характеристик ветра в пуктах с умеренными и сильными ветрами.

Расчет для высоты $h=40$ м показал следующее: $U_c=12,74$ м/с; $c=14, 23$ м/с; $U_{mx}=23,35$ м/с. Тогда условия эффективной ВЭУ приняли вид [5]:

$$\begin{cases} U_0 < 12,74 \text{ м/с}; 12,74 \text{ м/с} < U_n \leq 23,35 \text{ м/с}; \\ U_{mx} > U_{nm}; P_{nm} \approx 0,18d^2U_{nm}^3. \end{cases}$$

Для оценки выбраны параметры, характерные для современных ВЭУ: $U_0=3$ м/с; $U_{nm}=16$ м/с; $U_{mx}=25$ м/с; $d=50$ м. Тогда номинальная мощность ВЭУ по формуле (6) равна 1,84 МВт, а коэффициент использования располагаемой мощности $\varphi_c=0,505$, т. е. при использовании данной ВЭУ можно за год получить 50,5 % от ее установленной мощности [8]. В этой работе отсутствует информация о том, как вычислялись полная и неполная гамма-функции.

Расчет с помощью разработанной программы показал, что $\varphi_c=0,270$, следовательно, и средняя производительность ВЭУ, найденная по формуле (8), за период времени T будет примерно в два раза меньше, чем в [8].

Результаты параметрического анализа представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Влияние на производительность ВЭУ начальной скорости ветра, при которой начинает вращаться колесо

Table 2. Influence of initial wind speed, at which the wheel starts running, on wind turbines performance

U_0 , м/с	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
φ_c	0,270	0,270	0,269	0,270	0,269
P_c , МВт	0,502	0,502	0,502	0,501	0,499

Таблица 3. Влияние на производительность ВЭУ максимальной скорости ветра, при которой установка выводится из рабочего режима

Table 3. Influence of maximum wind speed, at which the unit is out of operating condition, on wind turbines performance

U_{mx} , м/с	21,0	23,0	25,0	27,0	29,0
φ_c	0,232	0,253	0,270	0,284	0,296
P_c , МВт	0,430	0,469	0,502	0,528	0,549

Как видно из полученных результатов, варьирование U_0 в диапазоне возможных скоростей, практически не влияет на значения φ_c и P_c . Напротив, повышение U_{mx} от 21 до 29 м/с привело к увеличению φ_c от 0,232 до 0,296, а P_c от 0,43 до 0,55 МВт.

Таким образом, усовершенствована и автоматизирована методика расчета производительности ветроэнергетической установки большой мощности, упрощающая проведение параметрического анализа. В ней с помощью критерия Пирсона осуществляется проверка статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко, находят параметры распределения путем численного решения трансцендентного уравнения с определением значений гамма-функции по интерполяционной формуле; в ходе вычисления среднего значения рабочей характеристики значения неполной гамма-функции находятся численным интегрированием по формуле Уэддла. Вся методика или ее части могут быть использованы в проектных организациях и учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 458 с.
2. Wind power in power systems / ed. by T. Ackermann. – Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2012. – 1049 p.
3. Mukund R. Patel Wind and solar power. – Washington D.C., CRC Press, 2006. – 448 p.
4. Федянин В.Я., Шарипов Н.Б. Возможности использования возобновляемых источников энергии для повышения эффективности систем теплоснабжения зданий в условиях юга Западной Сибири // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 202–206.
5. Фортгов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
6. Минин В.А., Степанов И.Р. Ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 1. – С. 106–114.

7. Twidell J., Weir T. Renewable energy resources. – New York, Taylor & Francis, 2006. – 601 p.
8. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Выбор ветроэнергетической установки и оценка ее производительности // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – 2005. – № 11–12. – С. 48–52.
9. Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
10. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Опыт монтажа и эксплуатации сетевой ветроэнергетической установки около г. Мурманска // Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 71–73.
11. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind energy explained: theory, design and application. – Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 577 p.
12. Кузнецов Н.Л. Сборник задач по надежности электрических машин. – М.: ИД МЭИ, 2008. – 408 с.
13. Голдаев С.В. Примеры и задачи по надежности систем теплоснабжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 172 с.

14. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. – М.: Наука, 1979. – 818 с.
15. Голдаев С.В., Коровина А.М., Радюк К.Н. Автоматизация расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла–Гнеденко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. XVI Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 333–335.
16. Голдаев С.В. Математическое моделирование и расчеты теплотехнических систем на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 188 с.
17. Крылов В.И., Шульгина Л.Т. Справочная книга по численному интегрированию. – М.: Физматлит, 1966. – 372 с.
18. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Оценка производительности ветроэнергетической установки с помощью функции распределения Вейбулла // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – 2006. – № 11–12. – С. 76–79.
19. Голдаев С.В., Радюк К.Н. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Вейбулла–Гнеденко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. XX Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 127–130.
20. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

Поступила 13.03.2015 г.

UDC 621.311.24

CALCULATING THE PERFORMANCE OF HIGH-POWER WIND TURBINE BY THE IMPROVED METHODOLOGY

Sergey V. Goldaev,

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

Karina N. Radyuk,

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

The relevance of the discussed issue is caused by the imperfection of existing methodology of predicting the characteristics of wind turbines.

The main aim of the study is to improve the existing methodology of calculating the performance of the high-power wind turbine, parametric analysis, comparing the results with those given by other authors.

Methods. In the improved methodology of calculation using Pearson's chi-squared test the statistical hypothesis on the distribution of the general totality of air velocities by Weibull–Gnedenko is tested. The distribution parameters are found by numerical solution of the transcendental equation with the definition of the gamma function interpolation formula. The values of the operating characteristic of the incomplete gamma function are defined by numerical integration using Weddle's rule. The methodology is automated for Turbo Pascal.

Results. The paper introduces the results of calculating the characteristics of the high-power wind turbine, found by using the improved parts of the methodology connecting with testing the statistical hypothesis on the distribution of the general totality of air velocities by Weibull–Gnedenko, the exact calculations of the values of the gamma function and incomplete gamma function. The comparison of the calculated results using the proposed methodology with those obtained by other authors found significant differences in the values of the sample variance and empirical Pearson. The authors have analyzed the initial and maximum wind speed influence on performance of the wind turbine.

Conclusions. The Weibull–Gnedenko function can be used to describe wind characteristics in the areas with moderate and strong winds. Varying the wind speed in the range of possible rates does not affect the average value of the operating characteristic and performance of the wind turbine. Increasing the maximum wind speed leads to a significant increase in these parameters. The improved methodology of calculating the performance of high-power wind turbines can be used in the design organizations and educational process.

Key words:

Wind turbine, wind speed, standard height of a weather vane, electrical power, average efficiency, operating characteristic, sample variance, distribution function of the Weibull–Gnedenko, air density, Pearson's chi-squared test, gamma function.

REFERENCES

1. Udalov S.N. *Vozobnovlyaemye istochniki energii* [Renewable energy sources]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2014. 458 p.
2. *Wind power in power systems*. Ed. by T. Ackermann. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2012. 1049 p.
3. Mukund R. Patel *Wind and solar power*. Washington D.C., CRC Press, 2006. 448 p.
4. Fedyanin V.Ya. *Vozmozhnosti ispolzovaniya vozobnovlyaemykh istochnikov energii dlya povysheniya effektivnosti sistem teplosnabzheniya zdaniy v usloviyakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Use of renewable energy to improve heating systems of buildings in Southern West Siberia]. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 1, pp. 202–206.
5. Fortov V.E., Popel O.S. *Sostoyanie razvitiya vozobnovlyaemykh istochnikov energii v mire i v Rossii* [The state of development of renewable energy sources in the world and in Russia]. *Thermal Engineering*, 2014, no. 6, pp. 4–13.
6. Minin V.A., Stepanov I.R. *Vetroenergeticheskiy kadastr Evropeyskogo Severa SSSR* [Wind energy cadastre of the European North of the USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1983, no. 1, pp. 106–114.

7. Twidell J., Weir T. *Renewable energy resources*. New York, Taylor & Francis, 2006. 601 p.
8. Konstantinov V.N., Abdrakhmanov R.S. Vybor vetroenergeticheskoy ustanovki i otsenka ee proizvoditelnosti [The choice of winds energy installations and the electric capacity evaluation]. *Izvestiya vuzov. Prolemy energetiki*, 2005, no. 11–12, pp. 48–52.
9. Obukhov S.G., Surkov M.A., Khoshnau Z.P. Metodika vybora vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Methods of choosing low-power wind turbines]. *Elektro*, 2011, no. 2, pp. 25–30.
10. Minin V.A., Dmitriev G.S. Opyt montazha i ekspluatatsii setevoy vetroenergeticheskoy ustanovki okolo g. Murmanska [The experience of installation and operation of the network wind turbine near Murmansk]. *Elektricheskie stantsii*, 2004, no. 2, pp. 71–73.
11. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. *Wind energy explained: theory, design and application*. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 577 p.
12. Kuznetsov N.L. *Sbornik zadach po nadezhnosti elektricheskikh mashin* [Collection of tasks on reliability of electrical machines]. Moscow, Publ. House MEI, 2008. 408 p.
13. Goldaev S.V. *Primery i zadachi po nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya* [Examples and problems of heat and power systems reliability]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 172 p.
14. *Spravochnik po spetsialnym funktsiyam* [Handbook of special functions]. Ed. by M. Abramovits, I. Stigan. Moscow, Nauka Publ., 1979. 818 p.
15. Goldaev S.V., Korovina A.M., Radyuk K.N. Avtomatizatsiya rascheta pokazateley nadezhnosti obektov, podchinyayushchikhsya raspredeleniyu Veybulla–Gnedenko [Automation of reliability indices calculation of objects submitting to Weibull–Gnedenko distribution]. *Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost»* [Proc. of All-Russian Scient. and Tech. Conf. Energy: ecology, reliability, safety]. Tomsk, 2011. pp. 333–335.
16. Goldaev S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschety teploekhnicheskikh sistem na EVM* [Mathematical modeling and computing heat engineering systems]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 188 p.
17. Krylov V.I., Shulgina L.T. *Spravochnaya kniga po chislennomu integrirvaniyu* [Handbook of numerical integration]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1966. 372 p.
18. Konstantinov V.N., Abdrakhmanov R.S. Otsenka proizvoditelnosti vetroenergeticheskoy ustanovki s pomoshchyu funktsii raspredeleniya Veybulla [Evaluation of wind turbine performance using Weibull distribution]. *Izvestiya vuzov. Prolemy energetiki*, 2006, no. 11–12, pp. 76–79.
19. Goldaev S.V., Radyuk K.N. Proverka s pomoshchyu kriteriya Pirsona statisticheskoy gipotezy o raspredelenii generalnoy sovoкупности по закону Veybulla–Gnedenko [Testing the statistical hypothesis on the distribution of the general totality by Weibull–Gnedenko using Pearson’s chi-squared test]. *Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost»* [Proc. of All-Russian Scient. and Tech. Conf. Energy: ecology, reliability, safety]. Tomsk, 2014. pp. 127–130.
20. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 816 p.

Received: 13 March 2015.

УДК 543.544.45

ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИРТОВ КАК ТРАССЕРОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПОЛИМЕТИЛСИЛОКСАНОВОЙ ФАЗЕ С АЦЕТИЛАЦЕТОНАТОМ КОБАЛЬТА

Гавриленко Михаил Алексеевич,

канд. хим. наук, доцент каф. технологии органических веществ и полимерных материалов Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: dce@mail.ru

Газиева Елизавета Александровна,

студент кафедры органической химии химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: bjuice93@mail.ru

Шумар Светлана Викторовна,

канд. хим. наук, доцент каф. аналитической химии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: shumar.svetlana@yandex.ru

Егошина Анастасия Викторовна,

студент кафедры ТОВПМ Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: stasy93@sibmail.com

Кирсанова Инна Вячеславовна,

студент кафедры ТОВПМ Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: bjuice93@mail.ru

Гавриленко Мария Михайловна,

студент медико-биологического факультета Сибирского государственного медицинского университета, Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2. E-mail: mmgavrilenko@gmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности и точности определения трассеров при мониторинге нефтяных месторождений. Трассерный анализ позволяет определить направления основных фильтрационных потоков при заводнении, что важно для принятия необходимых технологических решений при нефтедобыче. Однако при мониторинге нефтяных месторождений с использованием разделяющихся трассеров специалисты сталкиваются с проблемой определения низких концентраций спиртов в неоднородных эмульсионных матрицах. Разделяющие трассеры позволяют оценить неоднородности нефтяных пластов вследствие распределения компонентов, например, спиртов, между водной и нефтяной фракцией.

Цель работы: исследование закономерностей хроматографического разделения алифатических спиртов и компонентов нефти на бинарной комбинированной фазе полиметилсилоксан ПМС-100, модифицированной ацетилацетонатом кобальта $Co(acac)_2$. Цель также включает оптимизацию состава неподвижной жидкой фазы для капиллярных колонок и выбор условий разделения, при которых нефтяные компоненты не мешают определению спиртов. Такой подход позволит достичь точного и воспроизводимого определения микроконцентраций спиртов C_3-C_5 .

Методы исследования: капиллярная газовая хроматография.

Оборудование. Хроматографическое исследование проведено на газовом хроматографе «Agilent Technologies-6890 N» с пламенно-ионизационным детектором и приставкой паровозного ввода пробы. Капиллярная колонка DB-1 длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм и толщиной пленки 0,3 мкм использована для сравнения. Рабочие кварцевые капиллярные колонки 20 м × 0,25 мм с фазой толщиной 0,30 мкм приготовлены с содержанием $Co(acac)_2$ 10..80 мас. % в неподвижной жидкой фазе ПМС-100. Эффективность колонок составила 3900–4200 т.т./м.

Результаты. Использование добавки ацетилацетоната кобальта в неполярную полиметилсилоксановую фазу позволяет добиться повышения селективности хроматографического разделения алифатических спиртов в буровой и нефтяной жидкостях. Показано, что в области 40 мас. % добавки модификатора наблюдаются экстремумы удерживания и величин энергии сорбции алифатических спиртов. Особенностью рекомендуемой неподвижной жидкой фазы для капиллярной газовой хроматографии является снижение матричного эффекта анализируемой пробы за счет разделения хроматографических пиков при разной скорости снижения времени элюирования компонентов.

Ключевые слова:

Алифатические спирты, трассер, буровая жидкость, нефть, газовая хроматография.

Введение

В настоящее время основным методом повышения нефтеотдачи является заводнение, то есть вытеснение нефти водой и водорастворимыми реагентами. На технологический процесс заводнения решающее влияние оказывает неоднородность пласта. Для исследования неоднородности пласта используют индикаторные методы, в которых водные растворы несорбирующихся веществ (индикаторов/трассеров) вводятся в нагнетательную скважину, и фиксируется их поступление в добывающие скважины. Это позволяет определить направления основных фильтрационных потоков при заводнении, что важно для принятия необходимых технологических решений при нефтедобыче. Для такого рода исследований используются нерастворимые, то есть устойчивые и несорбирующиеся «водные», трассеры, которые движутся со скоростью водной фазы в пласте, не взаимодействуя с другими веществами и фазами при прохождении через коллектор. Проведение трассерных исследований предполагает использование любых трассеров, не нарушающих геохимического равновесия пластовых флюидов и не ухудшающих нефтевытесняющие свойства нагнетаемой воды [1]. Алифатические спирты относятся к трассерам, частично растворимым в нефти, и, несмотря на возможность биодegradации, широко используются в трассерных исследованиях [2–4]. Определение спиртов чаще всего проводится методом газовой хроматографии с предварительным отделением или концентрированием спиртов либо на селективных капиллярных колонках [5, 6]. Для придания селективности капиллярным колонкам используют модифицирование полимерами, комплексами металлов, специальной обработкой поверхности [7–9].

В настоящее время сорбционные материалы, модифицированные комплексами металлов, используют для решения специальных задач по повышению селективности разделения между гомологическими рядами органических веществ [10–12]. Сорбенты с поверхностными адсорбционными слоями и бинарные фазы, включающие в себя хелатные комплексы металлов, способны к проявлению специфических межмолекулярных взаимодействий между атомом металла и компонентами разделяемой смеси, что обеспечивает повышенную селективность разделения. Ранее показано, что в ряду хелатных комплексов переходных металлов оптимальная селективность разделения алифатических спиртов от неполярных органических соединений связана с ацетилацетонатом кобальта [13]. В настоящей работе исследованы закономерности хроматографического разделения алифатических спиртов на бинарной фазе полиметилсилоксан ПМС-100 с ацетилацетонатом кобальта $\text{Co}(\text{acac})_2$ в различных концентрациях.

Экспериментальная часть

Хроматографическое исследование проведено на газовом хроматографе «Agilent Technologies-6890 N» с пламенно-ионизационным детектором и приставкой парофазного ввода пробы. Образование равновесной паровой фазы проводили при 85°C с термостатированием с течение 5 мин. В качестве эталона использована капиллярная колонка DB-1 длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм и толщиной пленки 0,3 мкм. Температура колонки на начальном этапе 40°C , затем нагрев в течение 5 мин со скоростью $4^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 175°C , выдержка при 200°C в течение 10 мин. В качестве газа-носителя использовали гелий со скоростью $4\text{ см}^3/\text{мин}$ и входным давлением 16 psi.

Кварцевые капиллярные колонки $20\text{ м} \times 0,25\text{ мм}$ подготовлены в одинаковых условиях. Для получения идентичной пленки фазы толщиной 0,30 мкм с различным соотношением в неподвижной жидкой фазе (НЖФ) $\text{Co}(\text{acac})_2$ и ПМС-100 готовили растворы указанных веществ в хлороформе таким образом, чтоб содержание хелата находилось в диапазоне 10...80 мас. % $\text{Co}(\text{acac})_2$ в ПМС-100. Затем раствором заполняли капиллярную колонку, создавая давление 0,3 атм на одном ее конце. Наполненный капилляр оставляли открытым до испарения растворителя, затем проводили кондиционирование колонки при 120°C в течение 6 ч. Эффективность колонок определена в диапазоне от 70 до 170°C по удерживанию *n*-алканов и составила 3900–4200 т.т./м.

Результаты и обсуждение

Повышение селективности разделения при использовании хелатных комплексов металлов является распространенным аналитическим приемом в газовой хроматографии [14]. Повышенная способность НЖФ с $\text{Co}(\text{acac})_2$ к специфическим донорно-акцепторным взаимодействиям подтверждается значениями коэффициентов селективности веществ на границе газ – бинарная фаза для тестовых соединений. Для оценивания оптимального соотношения модификатора и полисилоксанового полимера рассчитан коэффициент емкости колонки от состава НЖФ $k=V_N/V_0$ [15] при удерживании спиртов. Наибольшая селективность разделения компонентов смесей кислородсодержащих соединений подтверждена для фаз с 30...45 мас. % содержания $\text{Co}(\text{acac})_2$ с экстремумом, соответствующим 40 мас. % хелата. Изменение селективности в отношении алифатических спиртов связано со структурированием бинарной фазы в этом диапазоне концентраций. Для уточнения диапазона концентраций и характера структурообразования рассчитаны значения теплоты сорбции некоторых веществ (табл. 1)

С увеличением содержания хелата в неполярной НЖФ мольная энергия сорбции возрастает.

Причиной такого эффекта может быть способность хелатного комплекса дополнительно включать во внешнюю координационную сферу кислородсодержащие фрагменты полимера как лиганды с образованием устойчивых комплексов. Наблюдаемый экстремум энергии сорбции около 40 мас. % содержания хелата имеет в своей основе образование упорядоченной структуры с облегченным доступом сорбатов к внутренним слоям НЖФ. То есть при модификации неполярной ПМС-100, основой удерживания на которой является абсорбция в объеме неподвижной жидкой фазы, молекулы $\text{Co}(\text{acac})_2$ координируют вокруг себя полимерные цепи. Аналогичный эффект был зафиксирован в ряде работ по взаимодействиям комплексов металлов с полярными полимерами при образовании структурированных фаз на поверхности сорбентов [16–18]. Таким образом насыщается координационная сфера хелата, частично компенсируется его полярность и уменьшение ее способности к донорно-акцепторным взаимодействиям. Общий вклад хемосорбции в удерживание в этом случае снижается, так как возможность специфического межмолекулярного взаимодействия проявляется только на границе раздела «газ – неподвижная жидкая фаза».

Таблица 1. Молярная энергия сорбции (кДж/моль) кислородсодержащих органических веществ на бинарных фазах, содержащих $\text{Co}(\text{acac})_2$

Table 1. Molar sorption energy (kJ/mole) of oxygen-containing organic substances on binary phases, containing $\text{Co}(\text{acac})_2$

Вещество Substance	Фаза Phase									
	10	20	30	35	40	45	50	60	80	
Метанол Methanol	17,2	19,1	20,0	31,4	35,6	33,6	26,3	25,4	24,8	
Этанол Ethanol	24,0	23,9	28,1	33,3	37,2	38,8	39,1	32,1	29,8	
Пропанол-1 Propanol-1	24,3	24,7	28,6	34,5	42,9	32,4	23,1	26,8	19,7	
Пропанол-2 Propanol-2	23,4	26,0	32,1	37,1	44,6	37,8	31,3	31,4	28,6	
Бутанол-1 Butanol-1	25,9	26,2	34,1	42,9	46,5	40,0	39,5	33,0	29,2	
Бутанол-2 Butanol-2	24,6	25,2	33,6	41,4	41,0	38,9	35,7	31,1	25,9	
2-Метилпропанол-1 2-Methylpropanol-1	24,4	24,3	32,4	44,7	45,8	33,8	33,7	27,6	23,1	
Пентанол-1 Penthanol-1	31,0	32,9	36,8	50,7	51,5	30,8	27,5	21,6	25,1	
Пентанол-2 Penthanol-2	30,5	31,9	34,1	48,0	46,7	27,0	28,6	22,6	20,7	
2-Метилбутанол-2 2-Methylbutanol-2	29,7	30,8	32,0	47,4	47,3	32,1	25,2	25,0	21,1	

Повышение селективности разделения также обусловлено комплексобразованием гидроксильной группы спиртов с электронодефицитными ча-

стями комплексного соединения, в то время как для алифатических и ароматических соединений свойственны электростатические взаимодействия на неполярной поверхности раздела неподвижной жидкой фазы. Относительное изменение энтальпии сорбции характеризуют через разность энтальпии ΔH и энтропии ΔS сорбции на исходной и модифицированной НЖФ как

$$\ln \alpha = -\frac{\Delta(\Delta H)}{RT} + \frac{\Delta(\Delta S)}{R}$$

Угол наклона зависимости $\ln \alpha$ от $1/T$ характеризует изменение теплоты сорбции спиртов на модифицированной фазе при повышении температуры для индивидуальных веществ (рис. 1). Наблюдается линейность графиков для спиртов и кривизна зависимости для алифатических соединений, что является подтверждением изменения структуры НЖФ.

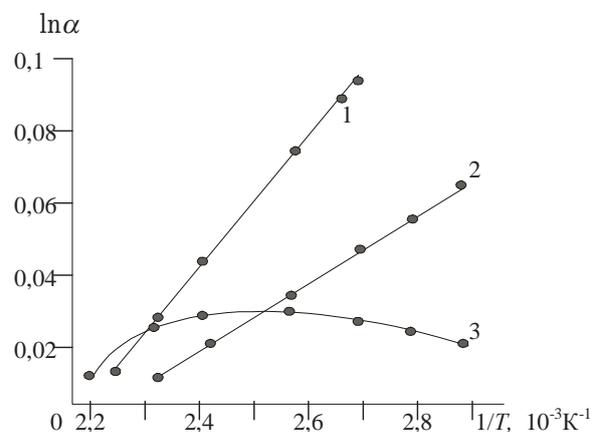


Рис. 1. Зависимость $\ln \alpha$ от $1/T$ для бутанола-1 (1), бутанола-2 (2) и *n*-додекана (3)

Fig. 1. Dependence of $\ln \alpha$ on $1/T$ for butanol-1 (1), butanol-2 (2) and *n*-dodecane (3)

Таким образом, при газохроматографическом разделении смеси спиртов в двухфазной системе «вода–углеводород» с использованием модифицированной $\text{Co}(\text{acac})_2$ ПМС-100 с увеличением углеводородной цепи как спиртов, так и алканов, время элюирования углеводородов будет снижаться медленнее времени элюирования спиртов. С ростом температуры константы распределения между углеводородной фазой и водой увеличиваются. При сравнении времени удерживания спиртов С4–С5 показано, что наличие изомерии углеродного скелета затрудняет элюирование при модифицировании фазы, а положение гидроксильной группы в спиртах линейного строения влияет незначительно. То есть основную роль в удерживании спиртов на хелатсодержащей НЖФ играет доступность гидроксильной группы, через которую осуществляется образование внешнесферного комплекса с хелатом. Температура элюирования оказывает существенное влияние на селективность разделения спиртов, но мало влияет на изменение энтальпии сорбции для алканов.

Проведено определение спиртов в буровой и нефтяной жидкостях с пробоподготовкой в парофазном анализаторе. Результаты определения на модифицированной $Co(acac)_2$ фазе и исходной ПМС-100 представлены в табл. 2. Эффективность достигается повышением селективности НЖФ по отношению к спиртам и, соответственно, удалению перекрывания хроматографических пиков компонентов нефти и трассеров (рис. 2).

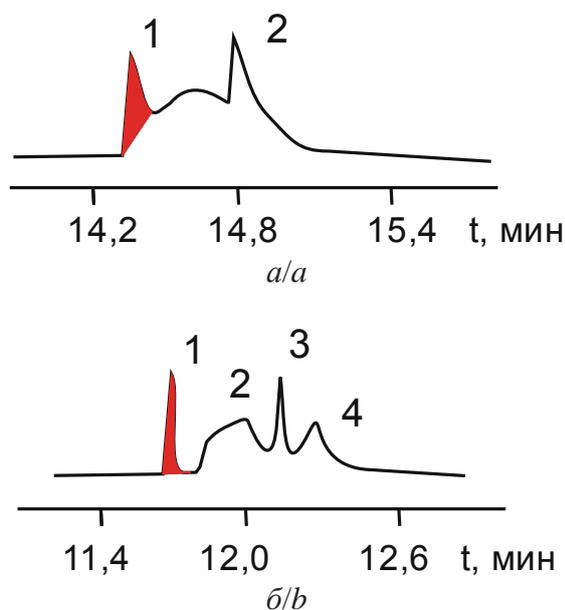


Рис. 2. Фрагмент хроматограммы буровой жидкости на исходной НЖФ ПМС-100 (а) и модифицированной 40 % мас. $Co(acac)_2$ (б): 1 – бутанол; 2,3,4 – компоненты буровой жидкости

Fig. 2. Fragment of chromatogram of drilling fluid on the initial liquid stationary phase (LSPH) PMS-100 (a) and modified 40 wt. % $Co(acac)_2$ (b): 1 – butanol; 2,3,4 – drilling liquid components

Проведенные исследования с модельными смесями показали, что увеличение воспроизводимости определения может быть связано с перераспределением спиртов в реальном объекте. Сравнение было осуществлено в системе «дистиллированная вода – n-додекан». Выбор n-додекана в качестве углеводородной фазы обусловлен тем, что результаты, полученные с его использованием, хорошо

коррелируют с результатами, полученными для нефти [19]. Спирты С1–С3 распределяются в основном в водную фазу, а для спиртов С4–С5 преобладает растворимость в органической фазе [20]. Полученные результаты свидетельствуют, что использование модифицированной $Co(acac)_2$ НЖФ ПМС-100 позволяет избежать матричного эффекта и достигнуть воспроизводимости определения спиртов в буровой жидкости и в нефти.

Таблица 2. Определение содержания спиртов С3, С4 (мг/л) в буровой и нефтяной жидкостях с использованием исходной НЖФ ПМС-100 и модифицированной 40 мас. % $Co(acac)_2$

Table 2. C3, C4 alcohols content (mg/l) in drilling and petroleum liquids using the initial LSPH PMS-100 and modified 40 wt. % $Co(acac)_2$

Спирт Alcohol	Введено Entered	Найдено/Found				
		n-Додекан n-dodecane	Буровая жидкость Drilling liquid		Нефть Oil	
			40 мас. % $Co(acac)_2$	ПМС-100 PMS-100	40 мас. % $Co(acac)_2$	ПМС-100 PMS-100
Пропанол-1 Propanol-1	50	50±5	50±4	50±3	48±12	51±5
	100	100±11	100±10	100±4	94±18	98±7
Бутанол-1 Butanol-1	50	50±7	50±4	50±4	51±15	50±5
	100	100±12	100±11	100±4	103±22	97±6

Закключение

Полярность хелатсодержащего ПМС-100 к спиртам в области концентрации 40 мас. % хелата в полимере повышена за счет образования стабильной структуры НЖФ и вклада в удерживание нестойких координационных связей, обусловленных присутствием $Co(acac)_2$. Применение данной фазы в капиллярной газовой хроматографии позволяет улучшить воспроизводимость определения спиртов как трассеров в буровых и нефтяных жидкостях и снизить матричный эффект за счет разделения хроматографических пиков при разной скорости снижения времени элюирования компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Water tracers in oilfield applications: Guidelines / C. Serres-Piole, H. Preud'homme, N. Moradi-Tehrani, C. Allanic, H. Jullia, R. Lobinski // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 98–99. – P. 22–39.
2. Thermodynamic analysis and reaction routes of steam reforming of bio-oil aqueous fraction / K.A. Resende, C.N. Ávila-Neto, R.C. Rabelo-Neto, F.B. Noronha, C.E. Hori // Renewable Energy. – 2015. – V. 80. – P. 166–176.
3. Sung M., Chen B.H. Using aliphatic alcohols as gaseous tracers in determination of water contents and air–water interfacial areas in unsaturated sands // Journal of Contaminant Hydrology. – 2011. – V. 126. – № 3–4. – P. 226–234.

4. Lovelock B.G. Steam flow measurement using alcohol tracers // Geothermics. – 2001. – V. 30. – № 6. – P. 641–654.
5. Slizhov Y.G., Gavrilenco M.A. Chromatographic properties of sorbents based on acetylacetonate metal complexes under steam chromatography conditions // Mendeleev Communications. – 2005. – № 6. – P. 261–262.
6. Ball G.F.M. Handbook of food analysis. – NY: Marcel Dekker, 1996. – 318 p.
7. Rykowska I., Wasiak W. Recent advances in gas chromatography for solid and liquid stationary phases containing metal ions // Journal of Chromatography A. – 2009. – V. 1216. – № 10. – P. 1713–1722.
8. Preparation of an iminodiacetic acid-modified capillary and its performance in capillary liquid chromatography and immobilized

- metal chelate affinity capillary electrophoresis / K. Tsukagoshi, Ya. Shimadzu, T. Yamane, R. Nakajima // *Journal of Chromatography A*. – 2004. – V. 1040. – P. 151–154.
9. Nawrocki J., Dunlap C., Li J. Part II. Chromatography using ultra-stable metal oxide-based stationary phases for HPLC // *Journal of Chromatography A*. – 2004. – V. 1028. – P. 31–62.
 10. Growth of metal-organic framework HKUST-1 in capillary using liquid-phase epitaxy for open-tubular capillary electrochromatography and capillary liquid chromatography / T. Bao, J. Zhang, W. Zhang, Z. Chen // *Journal of Chromatography A*. – 2015. – V. 1381. – P. 239–246.
 11. Gavrilenko M.A., Kasymova T.A., Gavrilenko N.A. Solid phase sorption of phenols on metals acetylacetonates // *Procedia Chemistry*. – 2014. – V. 10. – P. 103–107.
 12. Wawrzyniak R., Wasiak W. Capillary complexation gas chromatography in analysis of cyclic and aromatic hydrocarbons // *Chromatographia*. – 2000. – V. 51. – P. 267–273.
 13. Sol-gel synthesis of chelate containing materials for gas chromatography / M.A. Gavrilenko, Yu.G. Slizhov, Zh.V. Faustova, T.A. Kasymova, N.A. Gavrilenko // *Advanced Materials Research*. – 2014. – V. 1040. – P. 448–452.
 14. Slizhov Yu.G., Gavrilenko M.A. Complexation with metal chelates at the phase interface in gas chromatography // *Russian Journal of Coordination Chemistry*. – 2002. – V. 28. – № 10. – P. 736–752.
 15. Пецев Н., Коцев Н. Справочник по газовой хроматографии. – М.: Мир, 1987. – 429 с.
 16. Botelho S.J., Bazylak A. The impact of fibre surface morphology on the effective thermal conductivity of a polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layer // *Journal of Power Sources*. – 2014. – V. 269. – P. 385–395.
 17. Kowalska T., Hobo T., Watabe K. Gas chromatography on a self-associating component of a binary phase. Retention model by formal analogy with conductance of electrolytes in dilute solution // *Chromatographia*. – 1995. – V. 41. – № 3/4. – P. 221–226.
 18. Boldog I., Rusanov E.B., Chernega A.N. One- and two-dimensional coordination polymers of 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-bipyrazolyl, a new perspective crystal engineering module // *Angew. Chem.* – 2001. – V. 40. – P. 34–35.
 19. Исследование распределения алифатических одноатомных спиртов C1–C5 в системе «пластовая вода – н-додекан» / Ю.И. Арутюнов, А.О. Ефремов, Л.А. Онучак, В.С. Дудиков // *Вестник СамГУ*. – 2012. – V. 94. – № 3/1. – P. 123–131.
 20. Mazaev V.V., Tomchuk N.N., Lavrenova N.A. Distribution coefficients in the water-dodecane system and the heats of adsorption of C1–C8 alcohols on silica // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. – 2007. – V. 81. – № 3. – P. 370–373.

Поступила 05.04.2015 г.

UDC 543.544.45

GAS CHROMATOGRAPHIC DETERMINATION OF ALCOHOLS AS TRACERS IN MONITORING OIL FIELDS WITH POLYMETHYLSILICONE PHASE MODIFIED BY COBALT ACETYLACETONATE

Mikhail A. Gavrilenko,

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

Elizaveta A. Gazieva,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bjuice93@mail.ru

Svetlana V. Shumar,

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

Inna V. Kirsanova,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: bjuice93@mail.ru

Anastasiya V. Egoshina,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: stasy93@sibmail.com

Maria M. Gavrilenko,

Siberian State Medical University, 2, Moskovskii trakt, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: mmgavrilenko@gmail.com

The relevance of the discussed issue is caused by the need to improve the reliability and accuracy of the tracers for monitoring oil fields. Tracer analysis allows us to determine the direction of the main filtration flows during flooding. This is important for taking necessary technological solutions for oil production. Separating tracers, such as alcohols, have the property of component distribution between water and oil fraction that allows estimating the heterogeneity of oil reservoirs.

The main aim of the research is to study the regularities of the chromatographic separation of aliphatic alcohols on the binary phase combined polymethylsiloxane PMS-100 modified with cobalt acetylacetonate $\text{Co}(\text{acac})_2$; to optimize the composition of liquid stationary phase for capillary columns and to select the conditions of separation when oil components do not interfere to accurate and reproducible determination of microconcentrations C3–C5 alcohols.

The methods used in the study: capillary gas chromatography.

Equipment. Chromatographic research was carried out using gas chromatograph «Agilent Technologies-6890 N» with a flame ionization detector and headspace sample introduction. Capillary column DB-1 of 30 m length, 0,25 mm internal diameter and 0,3 micrometers film thickness was used for comparison. Working silica capillary column 20 m \times 0,25 mm were prepared under the same conditions to obtain an identical phase film thickness of 0,30 microns with a content $\text{Co}(\text{acac})_2$ in a liquid stationary phase PMS-100 10...80 % weight. The effectiveness of the speakers was 3900–4200 t.p./m.

The results. Use of cobalt acetylacetonate additives into polymethylsiloxane nonpolar phase allows increasing the selectivity of the chromatographic separation of aliphatic alcohols in drilling and petroleum drilling fluids. It is shown that in the region of 40 wt. % of modifier additives the extrema of retention and values of adsorption energy of aliphatic alcohols are observed. The advantage of the recommended liquid stationary phase for capillary gas chromatography is the decrease of the matrix effect of the sample by separating the chromatographic peaks at different speeds of reducing the elution time components.

Key words:

Aliphatic alcohols, tracer, drilling fluid, oil, gas chromatography.

REFERENCES

- Serres-Piole C., Preud'homme H., Moradi-Tehrani N., Allanic C., Jullia H., Lobinski R. Water tracers in oilfield applications: Guidelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 98–99, pp. 22–39.
- Resende K.A., Ávila-Neto C.N., Rabelo-Neto R.C., Noronha F.B., Hori C.E. Thermodynamic analysis and reaction routes of steam reforming of bio-oil aqueous fraction. *Renewable Energy*, 2015, vol. 80, pp. 166–176.
- Sung M., Chen B.H. Using aliphatic alcohols as gaseous tracers in determination of water contents and air–water interfacial areas in unsaturated sands. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2011, vol. 126, no. 3–4, pp. 226–234.
- Lovelock B.G. Steam flow measurement using alcohol tracers. *Geothermics*, 2001, vol. 30, no. 6, pp. 641–654.
- Slizhov Y.G., Gavrilenco M.A. Chromatographic properties of sorbents based on acetylacetonate metal complexes under steam chromatography conditions. *Mendeleev Communications*, 2005, no. 6, pp. 261–262.
- Ball G.F.M. *Handbook of food analysis*. NY, Marcel Dekker, 1996. 318 p.
- Rykowska I., Wasiak W. Recent advances in gas chromatography for solid and liquid stationary phases containing metal ions. *Journal of Chromatography A*, 2009, vol. 1216, no. 10, pp. 1713–1722.
- Tsukagoshi K., Shimadzu Ya., Yamane T., Nakajima R. Preparation of an iminodiacetic acid-modified capillary and its performance in capillary liquid chromatography and immobilized metal chelate affinity capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 2004, vol. 1040, pp. 151–154.
- Nawrocki J., Dunlap C., Li J. Part II. Chromatography using ultra-stable metal oxide-based stationary phases for HPLC. *Journal of Chromatography A*, 2004, vol. 1028, pp. 31–62.
- Bao T., Zhang J., Zhang W., Chen Z. Growth of metal–organic framework HKUST-1 in capillary using liquid-phase epitaxy for open-tubular capillary electrochromatography and capillary liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2015, vol. 1381, pp. 239–246.
- Gavrilenco M.A., Kasymova T.A., Gavrilenco N.A. Solid phase sorption of phenols on metals acetylacetonates. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 103–107.
- Wawrzyniak R., Wasiak W. Capillary complexation gas chromatography in analysis of cyclic and aromatic hydrocarbons. *Chromatographia*, 2000, vol. 51, pp. 267–273.
- Gavrilenco M.A., Slizhov Yu.G., Faustova Zh.V., Kasymova T.A., Gavrilenco N.A. Sol-gel synthesis of chelate containing materials for gas chromatography. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 448–452.
- Slizhov Yu.G., Gavrilenco M.A. Complexation with metal chelates at the phase interface in gas chromatography. *Russian Journal of Coordination Chemistry*, 2002, vol. 28, no. 10, pp. 736–752.
- Petsev N., Kotsev N. *Spravochnik po gazovoi khromatografii* [Handbook on gas chromatography]. Moscow, Mir Publ., 1987. 429 pp.
- Botelho S.J., Bazylak A. The impact of fibre surface morphology on the effective thermal conductivity of a polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layer. *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 269, pp. 385–395.
- Kowalska T., Hobo T., Watabe K. Gas chromatography on a self-associating component of a binary phase. Retention model by formal analogy with conductance of electrolytes in dilute solution. *Chromatographia*, 1995, vol. 41, no. 3/4, pp. 221–226.
- Boldog I., Rusanov E.B., Chernega A.N. One- and two-dimensional coordination polymers of 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-bipyrazolyl, a new perspective crystal engineering module. *Angew. Chem.*, 2001, vol. 40, pp. 34–35.
- Arutyunov Yu.I., Efremov A.O., Onuchak L.A., Dudikov V.S. Issledovanie raspredeleniya aiphaticeskikh odnoatomnykh spirtov C1–C5 v sisteme «plastovaya voda – n-dodekan» [Research of distribution of C1–C5 aliphatic monoatomic alcohols in the system «formation water–n-dodecane»]. *Vestnik SamGU*, 2012, vol. 94, no. 3/1, pp. 123–131.
- Mazaev V.V., Tomchuk N.N., Lavrenova N.A. Distribution coefficients in the water-dodecane system and the heats of adsorption of C1–C8 alcohols on silica. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2007, vol. 81, no. 3, pp. 370–373.

Received: 05 April 2015.

УДК 621.3.001.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА КАК ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Исаев Юсуп Ниязбекович,

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. электрических сетей и электротехники
Энергетического института Национального исследовательского Томского
политехнического университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: isaev_yusup@mail.ru

Старцева Елена Вячеславовна,

ст. преподаватель каф. электроэнергетических систем Энергетического
института Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: s.e.v.75@mail.ru

Щекотуев Артем Валерьевич,

аспирант каф. электрических сетей и электротехники Энергетического
института Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: Shchekotuev@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью локализации дефектов обмоток трансформатора при его диагностике. Определить пространственное расположение дефектов вдоль обмотки трансформатора возможно, только если рассматривать трансформатор как систему с распределенными параметрами.

Цель работы: представление обмотки трансформатора в виде распределенной электрической цепи и исследование переходных процессов такой цепи в двух случаях, при заземленном конце обмотки и при разомкнутом конце обмотки; определение начального и установившегося распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора при заземленном конце обмотки и при разомкнутом конце обмотки; поиск возможных путей преодоления перенапряжений, возникающих вдоль обмотки трансформатора. Целью работы также является получение переходной функции при единичном воздействии, для того чтобы в последующем можно было использовать интеграл Дюамеля, позволяющий получать переходные процессы в обмотке трансформатора при произвольном внешнем воздействии.

Методы исследования основаны на решении уравнений в частных производных с использованием преобразования Лапласа и передаточных функций. При этом используются начальные условия вдоль обмотки трансформатора и краевые условия на концах обмотки. Окончательное решение уравнения в частных производных представляется в виде ряда, то есть в виде суперпозиции волн с различными частотами.

Результаты. Приводятся графические пространственно-временные зависимости напряжения вдоль обмотки при различных краевых условиях; получена передаточная функция распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора позволяющая определять: начальное и установившееся распределения напряжений; перенапряжения при переходных режимах; оптимальные значения распределенных емкостей, и минимизировать перенапряжения вдоль обмотки.

Ключевые слова:

Обмотки трансформатора, волновые процессы, распределенные параметры, граничные условия, передаточная функция.

Введение

Трансформатор является одним из основных узлов электрических сетей. При моделировании электрических сетей трансформатор принято представлять в виде электрической схемы замещения с сосредоточенными параметрами [1–5]. И это оправдано при промышленных частотах $f=50$ Гц. Однако если в сети возникают более высокочастотные возмущения, длина волн которых меньше или соизмерима с пространственными размерами трансформатора, более точная схема замещения должна быть схемой с распределенными параметрами [6–9]. Это хорошо выявляется при диагностике трансформатора короткими импульсами, пространственная длительность которых много меньше длины обмотки трансформатора [10–12]. Рас-

чет обмоток трансформатора в виде схемы с распределенными параметрами гораздо сложнее, по сравнению с обыкновенными дифференциальными уравнениями, возникающими в схемах с сосредоточенными параметрами, так как необходимо решать дифференциальные уравнения в частных производных. Эта сложность проявляется при внесении дополнительной пространственной координаты, которая преобразует схему с сосредоточенными параметрами в схему с распределенными параметрами. При этом появляется возможность пространственной локализации повреждений трансформаторных обмоток, что очень важно при его диагностике [9–13]. Более детальное исследование трансформаторных обмоток при аварийных режимах можно получить, представив переходные

процессы в распределенных схемах в виде распространения волн, получая при этом более богатую физическую картину явления [6, 7, 9–14].

Цель работы

Цель работы включает в себя следующие пункты:

- исследование переходных процессов электрической цепи в двух случаях: при заземленном конце обмотки и при разомкнутом конце обмотки, причем обмотки трансформатора представлены в виде в виде распределенной электрической цепи;
- при заземленном конце обмотки и при разомкнутом конце обмотки определить начальное и установившееся распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора;
- поиск возможных путей преодоления перенапряжений, возникающих вдоль обмотки трансформатора.

Постановка задачи и основные соотношения

Электрическую схему замещения с распределенными параметрами можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1, где R , L_0 – индуктивность и сопротивления на единицу длины обмотки; C_1 – емкость на единицу длины обмотки; C_2 – емкость обмотки на единицу длины относительно земли.

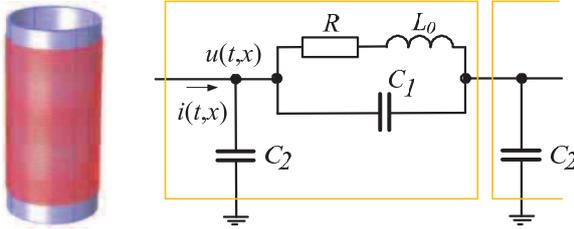


Рис 1. Обмотка трансформатора и схема замещения элемента обмотки

Fig 1. Transformer winding and equivalent circuit of winding element

В соответствии со схемой замещения элемента обмотки трансформатора (рис. 1) уравнение трансформаторной обмотки как распределенной системы можно записать в виде [6, 7]

$$\begin{cases} L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + Ri(x,t) = \\ = -\frac{\partial}{\partial x} \left[L_0 C_1 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + RC_1 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + u(x,t) \right]; \\ C_2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x}. \end{cases} \quad (1)$$

Для решения этих уравнений будем использовать операторный метод расчета [15–17]. Перейдем от оригиналов тока и напряжения к их операторным изображениям, предполагая нулевые начальные условия, из (1) получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (L_0 p + R)I(x, p) = \\ = -(L_0 C_1 p^2 + RC_1 p + 1) \frac{d}{dx} U(x, p); \\ pC_2 U(x, p) = -\frac{dI(x, p)}{dx}. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) может быть переписана в виде:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} U(x, p) - \gamma^2 U(x, p) = 0; \\ \frac{d^2}{dx^2} I(x, p) - \gamma^2 I(x, p) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\gamma = \frac{\sqrt{(pL_0 + R)pC_2}}{\sqrt{p^2 L_0 C_1 + pRC_1 + 1}}$.

Решения уравнений системы (3) будем искать в виде [15, 17]:

$$\begin{cases} U(x, p) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}; \\ I(x, p) = -\frac{A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}}{Z_w}, \end{cases} \quad (4)$$

где в (4) Z_w – волновое сопротивление обмотки, определяемое соотношением

$$Z_w = \frac{pL_0 + R}{(p^2 L_0 C_1 + pRC_1 + 1)\gamma} = \frac{\sqrt{\frac{pL_0 + R}{pC_2}}}{\sqrt{p^2 L_0 C_1 + pRC_1 + 1}}.$$

Найдем константы интегрирования A_1 , A_2 из краевых условий, предполагая, что в конце обмотки заземлена (рис. 2, а), а к началу обмотки подается напряжение $E(p)$, тогда система уравнений (4) может быть переписана:

$$\begin{cases} E = A_1 + A_2; \\ 0 = A_1 e^{\gamma L} + A_2 e^{-\gamma L}, \end{cases} \rightarrow \rightarrow \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ e^{\gamma L} & e^{-\gamma L} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} A_1 = \frac{E(p)e^{-\gamma L}}{sh(\gamma L)} \\ A_2 = -\frac{E(p)e^{\gamma L}}{sh(\gamma L)} \end{cases}$$

Здесь L – длина трансформаторной обмотки. Подставляя значения коэффициентов A_1 и A_2 , получаем выражения для напряжения и тока вдоль обмотки при ее заземленном конце

$$\begin{cases} U(x, p) = \frac{E(p)sh(\gamma(L-x))}{sh(\gamma L)}, \\ I(x, p) = \frac{E(p)ch(\gamma(L-x))}{Z_w sh(\gamma L)}. \end{cases} \quad (5)$$

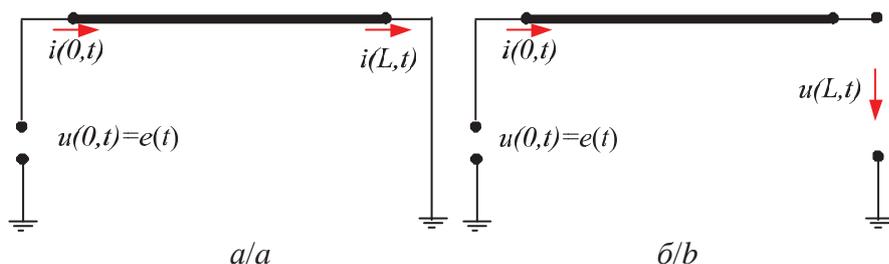


Рис 2. Краевые условия для обмотки трансформатора: а) заземленной на конце; б) разомкнутой на конце
Fig. 2. Boundary conditions for transformer winding: a) grounded at the end; b) open at the end

Аналогично находим коэффициенты для случая, когда обмотка разомкнута на конце (рис 2, б).

$$\begin{cases} E = A_1 + A_2; \\ IZ_w = 0 = A_1 e^{\gamma L} - A_2 e^{-\gamma L}, \end{cases} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ e^{\gamma L} & -e^{-\gamma L} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} A_1 = \frac{E(p)e^{-\gamma L}}{ch(\gamma L)} \\ A_2 = \frac{E(p)e^{\gamma L}}{ch(\gamma L)} \end{pmatrix}.$$

Подставляя значения коэффициентов, получаем выражения для напряжения и тока вдоль обмотки при ее разомкнутом конце

$$U(x, p) = \frac{E(p)ch(\gamma(L-x))}{ch(\gamma L)},$$

$$I(x, p) = \frac{E(p)sh(\gamma(L-x))}{Z_w ch(\gamma L)}. \quad (6)$$

Если на вход устройства подать напряжение, равное дельта функции Дирака

$$u(0, t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{если } t = 0; \\ 0 & \text{если } t \neq 0, \end{cases}$$

$$W_u(x, p) = \frac{sh(\gamma(L-x))}{sh(\gamma L)},$$

то в пространстве изображений вместо $E(p)$ нужно подставить единицу [18–20].

Таким образом, получаем передаточные функции для напряжений при заземленном и свободном концах обмотки трансформатора соответственно.

$$W_u(x, p) = \frac{sh(\gamma(L-x))}{sh(\gamma L)}, \quad W_u(x, p) = \frac{ch(\gamma(L-x))}{ch(\gamma L)}.$$

С помощью полученных передаточных функций легко получить установившийся и начальный режимы работы обмотки трансформатора [19].

Учитывая, что при $p \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 0$, из первого выражений (5) и (6) можно получить соотношения для распределения напряжений при установившемся режиме работы обмотки трансформатора. При ее заземленном конце мы получаем

$$u_{0\infty 0}(x) = \lim_{p \rightarrow 0} W_u(x, p) = \frac{sh(\gamma(L-x))}{sh(\gamma L)} = \frac{L-x}{L} = 1 - \frac{x}{L}, \quad (7)$$

при ее разомкнутом конце имеем

$$u_{0\infty 0}(x) = \lim_{p \rightarrow 0} W_u(x, p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{ch(\gamma(L-x))}{ch(\gamma L)} = 1. \quad (8)$$

В другом предельном случае, при $p \rightarrow \infty, \gamma \rightarrow \frac{1}{L} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$ из первых выражений (5) и (6) можно

получить начальное распределение напряжения [5] $u(x, 0) = u_{\text{нач}}$ в обмотке трансформатора. При ее заземленном конце получаем

$$u_{1\infty \times}(x) = \lim_{p \rightarrow \infty} W_u(x, p) = \frac{sh\left(\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}(1-x/L)\right)}{sh\left(\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right)}, \quad (9)$$

при ее разомкнутом конце имеем

$$u_{1\infty \times}(x) = \lim_{p \rightarrow \infty} W_u(x, p) = \frac{ch\left(\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}(1-x/L)\right)}{ch\left(\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right)}. \quad (10)$$

Теперь найдем распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора при воздействии постоянного напряжения в ее начале и при условии заземленного конца обмотки трансформатора. Для этого нужно найти оригинал произведения передаточной функции, умноженной на изображение постоянного напряжения E

$$\frac{E}{p} W_u(x, p) = \frac{E}{p} \frac{sh(\gamma(L-x))}{sh(\gamma L)}.$$

Корни характеристического уравнения определяются следующим образом

$$p = 0, \quad sh(\gamma p) = 0 \rightarrow \gamma_k = jk\pi \quad (k = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\frac{\sqrt{(L_0 p_k + R)p_k C_2}}{\sqrt{L_0 C_1 p_k^2 + RC_1 p_k + 1}} = j \frac{k\pi}{L} \rightarrow p_k = -\frac{R}{2L_0} \pm j\beta_k,$$

где β_k – собственная частота, определяемая соотношением

$$\beta_k = \frac{k\pi}{\sqrt{L_0(L^2 C_2 + k^2 \pi^2 C_1)}}.$$

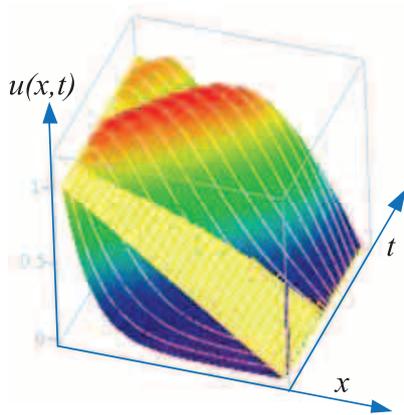
Тогда выражение для распределения напряжения вдоль обмотки можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{u(x,t)}{E} &= 1 - \frac{x}{L} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{sh(\gamma_k(L-x))e^{p_k t}}{p_k L ch(\gamma_k L) \left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k}} = \\ &= 1 - \frac{x}{L} - \frac{2}{\pi} e^{-\frac{R}{2L_0} t} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(k\pi \frac{x}{L}\right) \cos(\beta_k t)}{k \left(1 + \frac{C_1}{C_2} k^2 \pi^2 \right)}. \end{aligned} \quad (11)$$

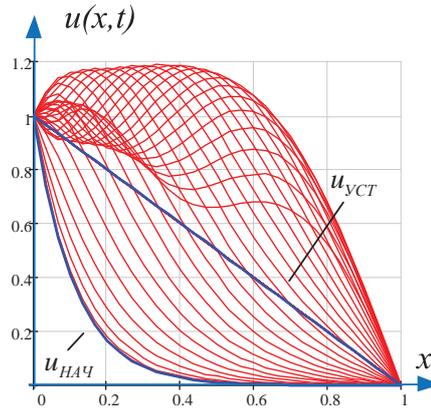
Результат расчета распределения напряжения по формуле (11) при параметрах обмотки $L=1$ м, $L_0=0,1$ Гн, $C_1=2000$ пф, $C_2=25$ пф, $R=10$ Ом, $E=1$ В приведен на рис. 3.

Проделив аналогичные операции можно получить распределение напряжения вдоль обмотки трансформатора в случае разомкнутой на конце обмотки:

$$\begin{aligned} \frac{u(x,t)}{E} &= 1 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{ch(\gamma_k(L-x))e^{p_k t}}{p_k L sh(\gamma_k L) \left(\frac{d\gamma}{dp} \right)_{p=p_k}} = \\ &= 1 - \frac{4}{\pi} e^{-\frac{R}{2L_0} t} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\left(\frac{2k+1}{2}\right) \frac{x\pi}{L}\right) \cos(\beta_k t)}{(2k+1) \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{2k+1}{2}\right)^2 \pi^2 \right)}. \end{aligned} \quad (12)$$



а/а



б/б

Рис 3. а) пространственно-временная картина распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора. Для сравнения указана плоскость установившегося режима; б) та же картина в профиле. Жирные линии показывают начальное значение напряжения $u_{\text{УСТ}}$ и напряжение при установившемся режиме $u_{\text{УСТ}}$ (обмотка заземлена на конце)

Fig. 3. а) spatial and temporal pattern of stress distribution along the transformer winding. Steady state plane is given for comparison; б) the same pattern in profile. The bold lines indicate voltage initial value $u_{\text{УСТ}}$ and voltage at steady state $u_{\text{УСТ}}$ (winding is grounded in the end)

Здесь коэффициенты β_k определяются выражением

$$\beta_k = \frac{\left(\frac{2k+1}{2}\right)\pi}{\sqrt{L_0 \left(L^2 C_2 + \left(\frac{2k+1}{2}\right)^2 \pi^2 C_1 \right)}}.$$

Результат расчета распределения напряжения по формуле (12) при параметрах обмотки $L=1$ м, $L_0=0,1$ Гн, $C_1=2000$ пф, $C_2=25$ пф, $R=10$ Ом, $E=1$ В приведен на рис. 4.

Перенапряжения, возникающие вдоль обмотки трансформатора, определяются начальным и конечным распределением напряжения, а также величинами элементов распределенной схемы. Поставим задачу минимизации перенапряжения вдоль обмотки. Для этого запишем дифференциальное уравнение для передаточной функции напряжения, переписав систему (2) в предположении, что величинами элементов можно варьировать

$$\frac{d}{dx} \frac{L_0 C_1 p^2 + RC_1 p + 1}{L_0 p^2 + Rp} \frac{d}{dx} U(x,p) - C_2 U(x,p) = 0.$$

Умножая уравнение на p и устремляя p к бесконечности, получаем в случае заземленной обмотки:

$$\frac{d}{dx} C_1(x) \frac{d}{dx} U_{\text{УСТ}}(x) - C_2(x) U_{\text{УСТ}}(x) = 0,$$

$$U_{\text{УСТ}}(x) = E \left(1 - \frac{x}{L} \right),$$

и уравнение для емкости и его решение

$$\frac{d}{dx} C_1(x) + C_2 L \left(1 - \frac{x}{L} \right) = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow C_1(x) = C_2 \left(\frac{x^2}{2} - Lx \right) + \text{const.}$$

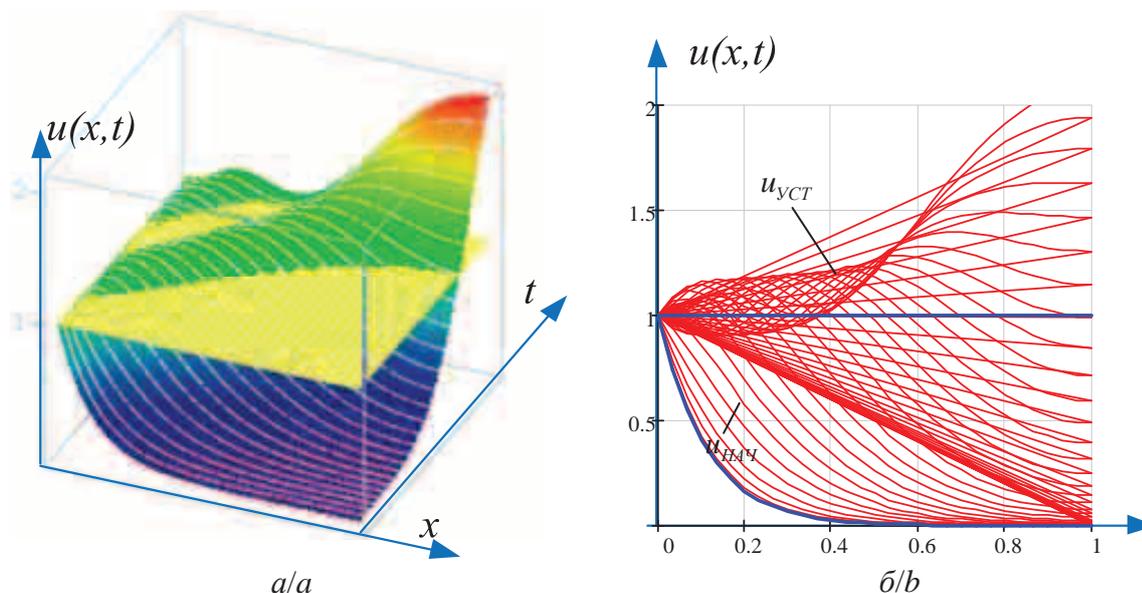


Рис 4. а) пространственно-временная картина распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора. Для сравнения указана плоскость установившегося режима. б) та же картина в профиле. Жирные линии показывают начальное значение напряжения $u_{нач}$ и напряжение при установившемся режиме $u_{уст}$ (обмотка разомкнута на конце)

Fig. 4. а) spatial and temporal pattern of stress distribution along the transformer winding. Steady state plane is given for comparison; б) the same pattern in profile. The bold lines indicate voltage initial value $u_{нач}$ and voltage at steady state $u_{уст}$ (coil is open at the end)

Постоянную надо выбирать так, чтобы при всех возможных x емкость C_1 была положительна и превышала естественную емкость обмотки C_1 .

Заключение

Авторами получена передаточная функция распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора, позволяющая определять: начальное и установившееся распределения напряжений

(формулы 9, 10 и 7, 8 соответственно) и перенапряжений при переходных режимах; оптимальные значения распределенных емкостей, и минимизировать перенапряжения вдоль обмотки.

Чтобы снизить перепады напряжения, можно использовать дополнительные емкости, включая их между обмотками катушки, или создавать кольцевые экраны, охватывающие часть обмотки катушек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 927 с.
2. Kulkarni S.V., Khaprde S.A. Transformer engineering-design and practice. – New York: Marcel Dekker, Inc. 2004. – 936 p.
3. Analysis of Three-Phase Power Transformer Windings Forces Caused by Magnetic Inrush and Short-Circuit Currents / Hongkui Li, Yan Li, Xi Sun, Dongxu Li, Youteng Jing // Proc. of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. – Chengdu, China, September 25–27, 2009. – P. 233–236.
4. Веников В.А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
5. Переходные процессы в электрических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пиратов. – М.: ИД МЭИ, 2008. – 416 с.
6. Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
7. Геллер Б., Веверка А. Волновые процессы в электрических машинах. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 632 с.
8. Investigation of transformer electromagnetic forces caused by external faults using FEM / A.C. de Azevedo, I. Rezende, A.C. Delaiba, J.C. de Oliveira, B.C. Carvalho, H. de S. Bronzeado // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. – Venezuela, Latin America, 2006. – P. 1–6.
9. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Advanced control state technology of transformer // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. 2013. – V. 5. – Iss. 17. – № 4. – P. 94–98.
10. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of mechanical stress process of transformer winding caused by short circuit currents // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2014. – V. 6. – Iss. 19. – № 2. – P. 59–63.
11. Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering. – 2014. – V. 6. – Iss. 18. – № 1. – P. 145–147.
12. Математическая модель трансформатора при его диагностики коротким импульсом / Ю.Н. Исаев, В.А. Колчанова, Г.А. Елгина, А.В. Лавринович // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-10526 (дата обращения: 15.04.2015).
13. Колчанова В.А., Исаев Ю.Н., Елгина Г.А. Моделирование трансформаторной обмотки при воздействии импульса напряжения в среде MATLAB Simulink // Современные проблемы

- науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-10763 (дата обращения: 15.04.2015).
14. Ильдарханов Р.Г., Усачев А.Е. Контроль состояния обмоток силовых трансформаторов путем спектрального анализа передаточных функций // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 38–47.
 15. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электроэнергетики. 2-е изд., доп. – Л.: Энергия, 1972. – 358 с.
 16. Шостак Р.Я. Операционное исчисление. – М.: Изд-во Высшая школа, 1972. – 279 с.
 17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 831 с.
 18. Исаев Ю.Н., Купцов А.М. Практика использования системы MathCAD в расчетах электрических и магнитных цепей. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. – 180 с.
 19. Исаев Ю.Н. Системы автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 142 с.
 20. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1 / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 654 с.

Поступила 01.06.2015 г.

UDC 621.3.001.24

INVESTIGATION OF WAVE PROCESSES OF TRANSFORMER WINDINGS AS A DISTRIBUTED ELECTRIC CIRCUIT

Yusup N. Isaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: isaev_yusup@mail.ru

Elena V. Startseva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: s.e.v.75@mail.ru

Artyom V. Schekotuev,

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

Relevance of the work is caused by the need of localize the defects of the transformer windings at diagnosis. It is possible to determine the spatial location of the defects along the transformer winding only if the transformer is considered as a system with distributed parameters.

The main aim of the study is to present the transformer winding in the form of distributed electric circuit and to study the transients of such a circuit in two cases, at grounded winding end and at open winding end; to determine primary and steady voltage distribution along the transformer windings at the grounded winding end and open winding end; to search for possible ways to overcome the over-voltage arising along the transformer winding. The aim of the work is to obtain as well the transitional function caused by a unit action, in order to use subsequently the Duhamel integral which allows obtaining the transients in the transformer winding at an arbitrary external action.

The methods used in the study are based on equations solution in partial derivatives using Laplace transform and transfer functions. It uses the initial conditions along the transformer winding and the boundary conditions at the ends of the windings. The final solution of partial differential equations is represented as a series, that is in the form of wave superposition with different frequencies.

The results. The obtained transfer function of the voltage distribution along transformer windings allows determining: primary and steady stress distribution; over-voltage transient conditions; optimal values of distributed capacitance, and minimizing overvoltage along the winding.

Key words:

Transformer winding, wave processes, distributed parameters, boundary condition, transfer function.

REFERENCES

- Ivanov-Smolenski A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machinery]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 927 p.
- Kulkarni S.V., Khaprde S.A. *Transformer engineering-design and practice*. New York, Marcel Dekker, Inc. 2004. 936 p.
- Hongkui Li, Yan Li, Xi Sun, Dongxu Li, Youteng Jing. Analysis of Three-Phase Power Transformer Windings Forces Caused by Magnetic Inrush and Short-Circuit Currents. *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*. Chengdu, China, September 25–27, 2009. pp. 233–236.
- Venikov V.A. *Elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
- Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratov M.V. *Perexhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transients in electric systems]. Moscow, MEI Press, 2008. 416 p.
- Heller B., Veverka A. *Volnovye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Wave processes in electric machines]. Moscow, State energy Publ., 1960. 632 p.
- Heller B., Veverka A. *Impulsnye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Switching in electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 440 p.
- De Azevedo A.C., Rezende I., Delaiba A.C., De Oliveira J.C., Carvalho B.C., De S. Bronzeado H. Investigation of transformer electromagnetic forces caused by external faults using FEM. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Venezuela, Latin America, 2006. pp. 1–6.
- Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Advanced control state technology of transformer. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2013, vol. 5, Iss. 17, no. 4, pp. 94–98.
- Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of mechanical stress process of transformer winding caused by short circuit currents. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, Iss. 19, no. 2, pp. 59–63.
- Lavrinovich V.A., Isaev Y.N., Mytnikov A.V. Modeling of state control procedure of power transformer winding by short probe pulses. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2014, vol. 6, Iss. 18, no. 1, pp. 145–147.
- Isaev Yu.N., Kolchanova V.A., Elgina G.A., Lavrinovich V.A. Matematicheskaya model transformatora pri ego diagnostike korotkim impulsom [Mathematical model of the transformer at its short pulse diagnosis]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 6. Available at: www.science-education.ru/113-10526 (accessed 15 April 2015).
- Isaev Yu.N., Kolchanova V.A., Elgina G.A. Modelirovanie transformatornoy obmotki pri vozdeystvii impulsa napryazheniya v srede MATLAB Simulink [Simulation of transformer winding under the influence of voltage pulse by MATLAB Simulink]. *Sovremennyye problemy nauki y obrazovaniya*, 2013, no. 6. Available at: www.science-education.ru/113-10763 (accessed 15 April 2015).
- Ildarkhanov R.G., Usachyov A.E. Kontrol sostoyaniya obmotok silovyykh transformatorov putem spektralnogo analiza peredatochnyykh funktsii [Control of condition of power transformer windings by spectral analysis of the transfer functions]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2010, no. 3–4, pp. 38–47.
- Levinshtein M.L. *Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektroenergetiki* [Operational calculus in problems of electric power engineering]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 358 p.
- Shostak P.Ya. *Operatsionnoe ischislenie* [Operational calculus]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1972. 279 p.
- Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 831 p.
- Isaev Yu.N., Kuptsov A.M. *Praktika ispolzovaniya sistemy MATKAD v raschetakh elekticheskikh y magnitnykh tsepey* [Practice of using the system MathCAD in calculation of electric and magnetic circuits]. Moscow, SOLON-PRESS, 2013. 180 p.
- Isaev Yu.N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Automated control systems]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 142 p.
- Pupkov K.A., Egupov N.D. *Metody klassicheskoy i sovremenoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and modern control theory]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Press, 2004. 654 p.

Received: 01 June 2015.

УДК 53.043, 536.24.01, 697.134

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ ИНСОЛЯЦИОННЫХ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ

Стрижак Павел Александрович,

д-р физ.-мат. наук, научный руководитель лаборатории моделирования процессов теплопереноса, профессор каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pavelspa@tpu.ru

Морозов Максим Николаевич,

аспирант, инженер каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, E-mail: tpu_chm@tpu.ru

Имитационные модели применяются инженерами при проектировании климатических систем зданий и сооружений. Незаменимыми считаются модели для задачи повышения энергоэффективности как существующих, так и создаваемых объектов капитального строительства. Модель может применяться как инструмент энергетического исследования (энергомоделирования) зданий и сооружений при разработке технико-экономического обоснования в системе энергоменеджмента в соответствии с ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use». Солнечное излучение – один из основных факторов, оказывающих влияние на тепловой режим здания. Внедрение интеллектуальной системы управления теплоснабжением позволяет повысить энергетическую эффективность при поддержании оптимальных климатических параметров в помещениях.

Цель исследования: разработка комплексной модели здания и блока имитации погодных условий для проведения исследования влияния энергии солнечного излучения на тепловые процессы внутри здания, а также для оценки потенциала энергосбережения типичных зданий и сооружений.

Методы исследования: имитационное моделирование с использованием программной среды Simulink и специализированной библиотеки «акаузального» моделирования Simscape.

Результаты. Разработана комплексная модель здания. Выполнены исследования инсоляционных процессов, характерных для зимних (февраль) климатических условий Западной Сибири. Представлены результаты моделирования динамики температуры воздуха в контрольных помещениях. Полученные данные об изменении теплового режима контрольных помещений позволили изучить процессы теплообмена с окружающей средой, а также установить влияние энергии солнечного излучения на работу системы управления теплоснабжением. Представлены выводы касательно эффективности компенсации возмущающего фактора с целью достижения энергосберегающего эффекта.

Ключевые слова:

Инсоляционные теплопоступления, тепловой режим здания, имитационная модель, система управления теплоснабжением, энергоэффективность.

Введение

Не смотря на колебание цен на энергоносители, неизменным остается рост тарифов на тепловую и электрическую энергию. На этом фоне не угасает интерес к энергоэффективным и ресурсосберегающим технологиям со стороны государства, а также конечных потребителей [1–3]. В балансе мирового потребления энергии до 40 % уходит на здания и сооружения, откуда до 50 % энергии расходуется на поддержание климатических условий в помещениях, пригодных для жизнедеятельности человека [4]. Как следствие, задачи эффективного энергопотребления зданий и сооружений на протяжении многих лет остаются ключевыми.

В настоящее время усилия ведущих мировых инженерных центров (ASHRAE, ISO, ABOK и др.) направлены на разработку и модернизацию стандартов энергоэффективных зданий. Практика показывает, что при создании таких домов особое внимание требуется уделять проектированию климатических систем. Ключевым фактором для сни-

жения трудоемкости проектирования является использование специализированных программных средств [5–7].

К современным программным средствам энергомоделирования предъявляются жесткие требования к точности используемых математических моделей. Среди факторов, влияющих на адекватность модели, можно выделить следующие: детализация моделей ограждающих конструкций, инженерных систем, погодных условий: влияние ветровой нагрузки, инсоляции и др.

Стоит отметить, что в процессе проектирования здания весьма важно учитывать влияние солнечного излучения на климат помещений. Эффект от инсоляции, в зависимости от местоположения объекта и его архитектурных особенностей, может достигать 30 % в общем балансе теплопоступлений за отопительный сезон [8, 9].

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния инсоляционных теплопоступлений на тепловой режим типичного здания. Научный

интерес представляет наблюдение за изменением теплового режима контрольных помещений, а также за функционированием системы теплоснабжения здания и системы управления теплотреблением при воздействии принятого основного возмущающего фактора – солнечного излучения.

Важность учета энергии солнечного излучения при исследовании климата помещений отмечается в работах [10–17]. Это позволяет, помимо поддержания оптимального теплового режима, способствовать достижению целевых показателей энергосбережения и энергоэффективности, указанных в Федеральном законе РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».

Математическая модель инсоляционных теплопоступлений

Под инсоляцией понимается [18] облучение поверхностей и пространств параллельными пучками лучей, поступающих от Солнца.

Известно, что на инсоляционные процессы влияют многие факторы, наиболее значимые из них: текущее состояние облачности в районе наблюдения, географическая широта района расположения объекта, пространственная ориентация и высота над уровнем моря облучаемых поверхностей ограждающих конструкций, действительное положение Солнца. Изменение данных факторов приводит к значительной неравномерности распределения излучения в течение суток в разные времена года [14, 19].

В общем случае при расчетах инсоляции можно руководствоваться методиками [20, 21]. На их основе разработаны специализированные программы и библиотеки, позволяющие рассчитывать продолжительность и интенсивность инсоляции для любой местности и времени года [22, 23].

Также стоит отметить, что в последнее время все чаще предлагают вводить дополнительные поправочные коэффициенты на снижение светопропускающих характеристик воздушного слоя из-за запыленности и загазованности городской атмосферы [8].

При создании математической модели для достижения поставленных исследовательских целей необходимо последовательно решить следующие задачи:

- расчет интенсивности теплового потока, приходящегося на поверхности различной пространственной ориентации;
- определение параметров светопропускания и поглощения солнечной радиации прозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций.

С учетом того, что для большинства зданий широко распространены горизонтальные и вертикальные поверхности различной ориентации по сторонам света, поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения [24] может быть определена в соответствии с методикой [25]. Для горизонтальных поверхностей справедливо сле-

дующее выражение для нахождения среднесуточного теплопоступления суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной) [26]:

$$q_{hor\ i} = \frac{Q_{hor\ i}}{n_i},$$

где $Q_{hor\ i}$ – среднее, в разрезе многолетней статистики, количество энергии, приходящееся на 1 квадратный метр горизонтальной поверхности для расчетного климатического района за i -й месяц, Вт·ч/м²; n_i – количество дней, приходящееся на i -й месяц.

Аналогичное выражение для вертикальных поверхностей j -й ориентации:

$$q_{ver\ ij} = \frac{S_{hor\ i} \cdot k_{ij} + \frac{D_{hor\ i}}{2}}{n_i},$$

где $S_{hor\ i}$, $D_{hor\ i}$ – характеристики поверхностной плотности потока соответственно прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для i -го месяца [27], Вт·ч/м²; k_{ij} – коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности падения прямого излучения на поверхность j -й ориентации для i -го месяца, принимается согласно [25].

Для оценки инсоляционных теплопоступлений на конкретные ограждающие поверхности необходимо учитывать также цвет и состояние поверхности. Применительно к непрозрачным массивным ограждающим конструкциям справедливо следующее выражение для нахождения теплового потока, который непосредственно поглощается поверхностью рассматриваемой конструкции:

$$q_{wall\ ij} = q_{ver\ ij} \cdot K_{col},$$

где K_{col} – коэффициент теплоотражения ограждающей поверхности, зависящий от её цветности.

Инсоляционные теплопоступления в помещение через светопрозрачные конструкции (окна и фонари) определяются по формуле [28]:

$$q_{win\ ij} = \tau_j k_j A_j q_{ver\ ij},$$

где τ_j – коэффициент учета затенения непрозрачными элементами окна, имеющего j -ю ориентацию; k_j – коэффициент относительного проникновения солнечной радиации через прозрачную часть окна j -й ориентации; A_j – площадь светопрозрачной конструкции, выходящей на j -ю сторону света, м².

При моделировании инсоляционных процессов приняты следующие допущения:

- вертикальные поверхности наружных ограждающих конструкций помещений ориентированы строго в южном, западном и северном направлениях;
- интенсивность инсоляционных теплопоступлений подчиняется закону нормального распределения;
- согласно рекомендации авторов работы [26] отраженная составляющая солнечной радиации

пии для холодного периода года в модели не учитывается;

- все удельные показатели интенсивности солнечного излучения приняты с учетом действительных условий облачности.

Описание объекта моделирования

Аналогично схеме [29] в качестве целевого объекта моделирования принято типичное здание административного плана. Для решения поставленной задачи выбрано шесть контрольных помещений, имеющих порядковые номера № 1–6: три группы, каждая включает две комнаты. Помещения имеют идентичную планировку с параметрами: площадь 41,52 м², объем 112,1 м³ (рис. 1). Коэффициент остекления K_{gl} имеет значение 0,23, что соответствует площади поверхности стены 17,85 м² и светопрозрачных конструкций 5,38 м² (за вычетом площади непрозрачного профиля стеклопакета).

Комнаты одной группы имеют одинаковую пространственную ориентацию наружных ограждающих поверхностей:

- 1-я группа (помещения № 1 и 2) – Юг;
- 2-я группа (помещения № 3 и 4) – Запад;
- 3-я группа (помещения № 5 и 6) – Север.

Далее помещения, ограждающие конструкции которых направлены на Юг, будут называться по-

мещениями южной ориентации (остальные направления ориентации – по аналогии).

Снабжение здания тепловой энергией реализовано через центральный тепловой пункт. На вводе трубопровода в здание установлен индивидуальный тепловой пункт (ИТП). Система отопления принята с верхним распределением теплоносителя, отопительные приборы соединены последовательно. Таким образом, каждая группа имеет общий вертикальный стояк: внутри группы четное (№ 2, 4, 6) помещение расположено первым по ходу движения теплоносителя, тогда как нечетное (№ 1, 3, 5) расположено ниже по стояку. Обвязка радиаторов выполнена по широко используемой схеме с байпасным каналом и регулирующим клапаном.

Система управления теплоснабжением здания принята распределенной структуры [29], включающей индивидуальные комнатные регуляторы.

Имитационная модель инсоляционных теплоступлений

Имитационная модель построена на базе приложения Simulink математического пакета Matlab. Применен блочно-ориентированный подход к моделированию и «визуальному» программированию системы теплоснабжения здания в совокупности

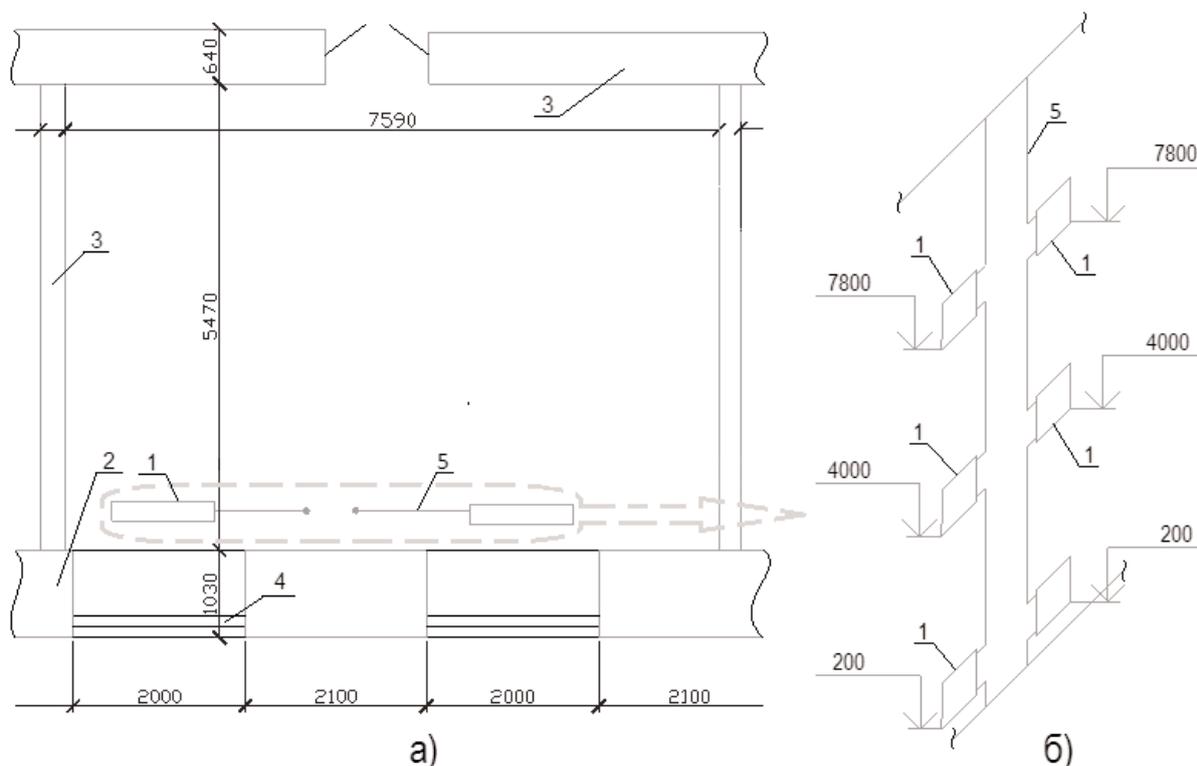


Рис. 1. Схематичное представление объекта моделирования (а – план помещения, б – часть аксонометрической схемы однотрубной системы отопления): 1 – отопительный прибор; 2, 3 – наружные и внутренние ограждающие конструкции; 4 – стеклопакет; 5 – водопроводная труба

Fig. 1. Diagram of the modelling object: (a is the plan of building spaces; б is the part of axonometric diagram of single-pipe heating system): 1 is the heating body; 2, 3 are the external and internal building envelops; 4 is the glass unit; 5 is the water-supply pipe

сти с широким функционалом программного продукта Matlab: инструменты для анализа динамики различных по сложности систем, связь с рабочей средой Workspace и другими приложениями пакета Matlab (например, Control System Toolbox), моделирование различных возмущений (детерминированных или случайных с различными законами распределения) и ситуаций (штатных или нештатных, в том числе аварийных), возникающих в процессе эксплуатации комплексных объектов и отдельных технических систем. Также при разработке модели применен пакет расширения Simscape, реализующий концепцию «акаузального» моделирования [30]. Модель отличается универсальностью и позволяет решать задачи прогнозирования и энергомоделирования зданий и сооружений различных назначений [5, 31].

Отличие настоящей модели от ранее представленных в [29, 32] заключается в возможности варьирования ключевых параметров (поверхностная плотность потока солнечного излучения, продолжительность, смещение) потока энергии солнечного излучения в широком диапазоне. Моделирование инсоляционных явлений в приложении Simscape позволяет учесть различные механизмы теплообмена, тепловую инерцию ограждающих конструкций, что максимально увеличивает точность модели, расширяет ее функционал и сферу применения. Для этого разработаны специализированные функциональные блоки имитации солнечной радиации (рис. 2), а также доработаны модели ограждающих конструкций (рис. 3).

На рис. 2 представлена основная часть блока имитации погодных условий, содержащая 4 элемента (Юг, Север, Восток, Запад).

Рис. 3 показывает модификацию блока светопрозрачной конструкции (стеклопакет), отличающегося наличием блока распределения солнечной

радиации (выделен пунктирной линией), который служит для определения индивидуальных характеристик поверхностей наружных конструкций – коэффициенты затенения и относительного проникновения солнечной радиации и другие характеристики светопропускания и поглощения.

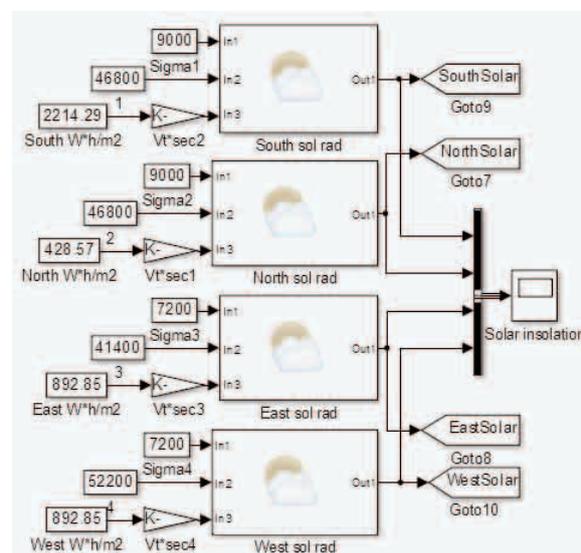


Рис. 2. Реализация блока имитации солнечной радиации в Matlab

Fig. 2. Implementation of solar radiation simulation block in Matlab

Результаты исследований

Для достижения заявленных целей проведено две серии численных экспериментов, заключающихся в исследовании распределения энергии солнечной радиации, приходящейся на массивные ограждающие конструкции (штукатуренная сте-

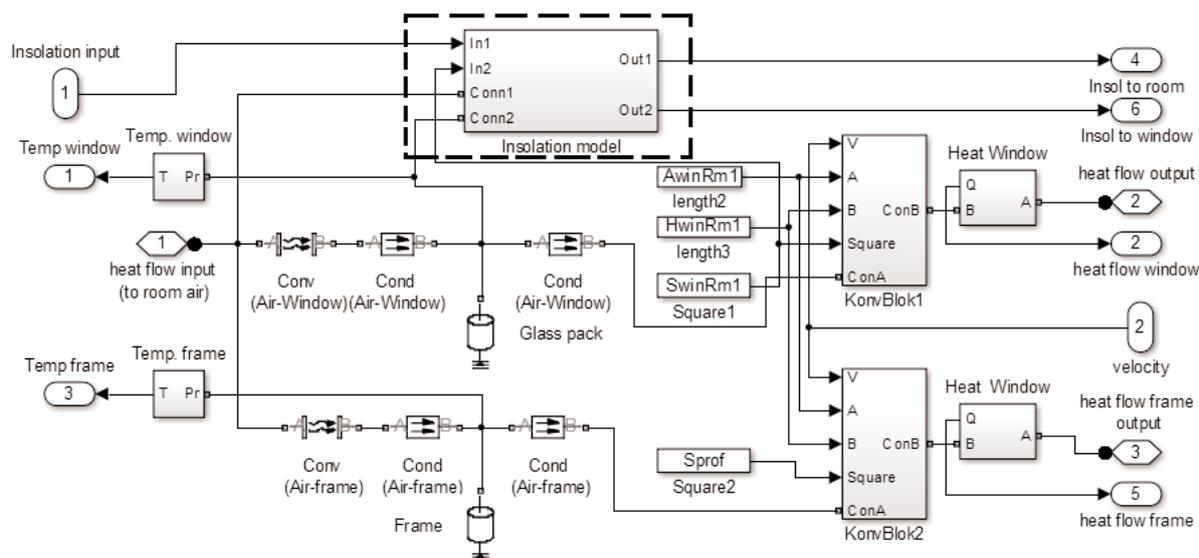


Рис. 3. Реализация модели ограждающих конструкций в Matlab

Fig. 3. Implementation of building envelop model in Matlab

на светло-серого цвета из кирпичной кладки) и окна (два двухкамерных стеклопакета с ПВХ-профилем), а также влияния инсоляции на тепловой режим помещений. Первая серия опытов проводилась при использовании интеллектуальной РСУ. Вторая – на базе одиночного контроллера ИТП без локальных контуров регулирования климата помещений.

Исходные данные:

- объект исследования: типичное здание административного плана;
- период исследования: февраль;
- место расположения объекта исследования: г. Томск.

Моделирование проводилось при условиях инсоляции, характерных для с. Александровское. Незначительное расстояние до г. Тоска (30 км на северо-восток) позволяет использовать данные о солнечном излучении применительно к объекту исследования. Вертикальные поверхности различной пространственной ориентации характеризуются следующими значениями среднесуточной поверхностной плотности потока солнечного излучения Q_{insol} [26]:

Юг – 2214,29 Вт·ч/м²;
Запад – 892,85 Вт·ч/м²;
Восток – 892,85 Вт·ч/м²;
Север – 428,57 Вт·ч/м².

В качестве основного возмущающего фактора выбрано тепlopоступление от солнечного излучения. Остальные погодные условия характеризуются постоянными значениями:

- температура наружного воздуха $T_{out} = -30$ °C;
- скорость ветра $v = 4$ м/с;
- направление ветра – с Севера на Юг.

На рис. 4 представлены характерные значения поверхностной плотности потока солнечного излучения, падающего на квадратный метр наружных конструкций различной пространственной ориентации.

Анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет сравнить показатели удельной интенсивности потока солнечной энергии, приходящейся на горизонтальную и вертикальные поверхности. Зависимости на рис. 5 дают информацию по распределению тепlopоступлений между светопрозрачной и непрозрачной конструкциями (для примера приведены результаты моделирования для помещений южной ориентации группы № 1) с учетом их геометрических размеров, а также индивидуальных характеристик поверхностей наружных конструкций.

Инсоляция через световой проем с установленным стеклопакетом характеризуется неполным пропусканием излучения через стеклопакет и складывается из трех основных составляющих:

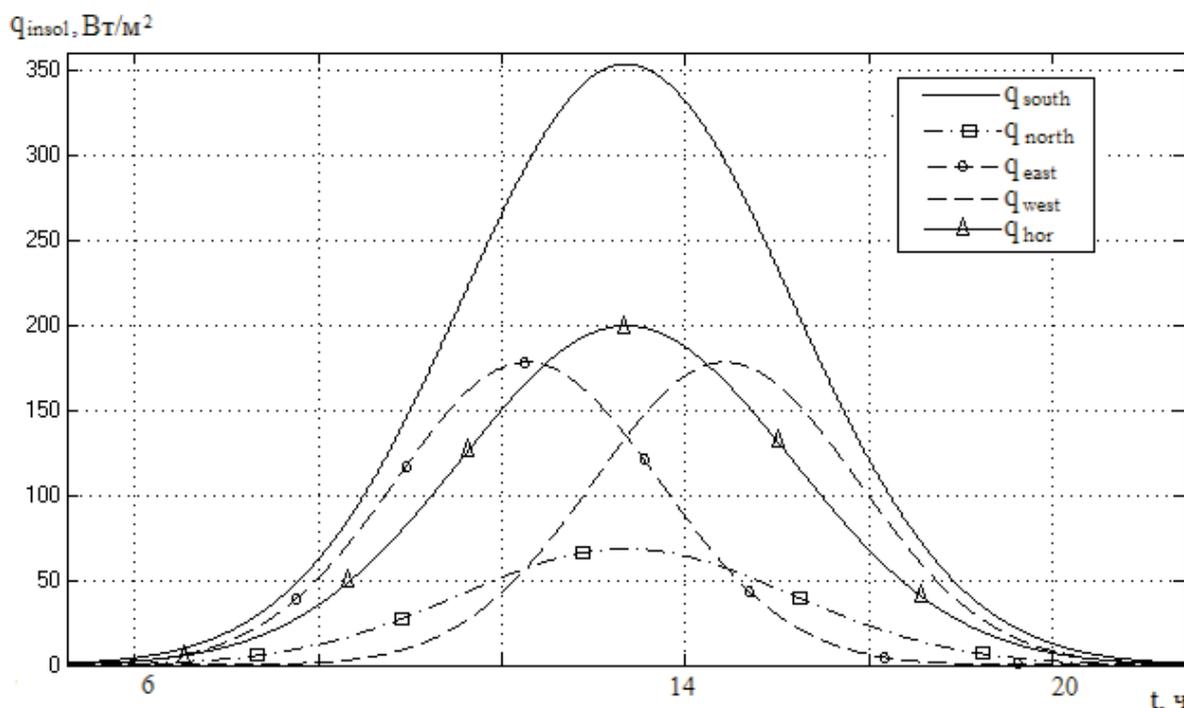


Рис. 4. Поверхностная плотность потока солнечного излучения q_{insol} (Вт/м²), поступающего на поверхности различной пространственной ориентации в течение суток (г. Томск, февраль): q_{south} – для вертикальной поверхности южной ориентации, q_{north} – северной ориентации, q_{east} – восточной ориентации, q_{west} – западной ориентации, q_{hor} – для горизонтальной поверхности

Fig. 4. Surface density of solar radiation flux q_{insol} (W/m²), entering the surfaces of different space orientation during the day (Tomsk, February): q_{south} – for vertical surface of south orientation, q_{north} – north orientation, q_{east} – east orientation, q_{west} – west orientation, q_{hor} – for horizontal surface

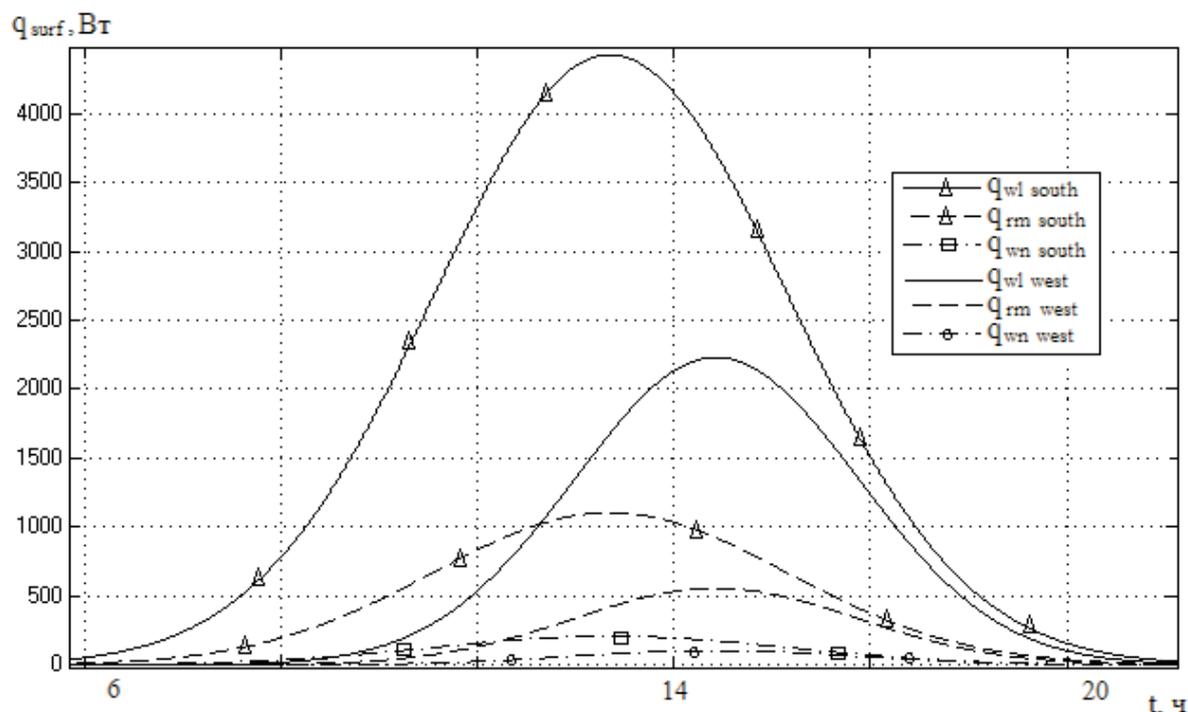


Рис. 5. Интенсивность солнечной радиации q_{surf} (Вт), поступающая на следующие поверхности (г. Томск, февраль): q_{wl} – наружных стен; q_{rm} – облучаемых объектов внутри помещений; q_{wn} – интенсивность солнечной энергии, поглощаемой стеклопакетом; индексы south и west определяют соответственно южную и западную ориентацию поверхностей

Fig. 5. Solar radiation intensity q_{surf} (W), entering the following surfaces (Tomsk, February): q_{wl} – outside walls; q_{rm} – irradiated objects inside the building; q_{wn} – intensity of solar energy absorbed by a glass unit; indices south and west determine south and west surface orientation, respectively

- отраженная от облучаемой поверхности в окружающую среду часть светового потока $q_{wn out}$;
- поглощенная конструкцией стеклопакета энергия q_{wn} ;
- оставшаяся часть энергии q_{rm} попадает непосредственно в помещение, где поглощается облучаемыми поверхностями различных объектов.

Процесс инсоляции непрозрачных конструкций протекает схоже со световыми проемами за исключением отсутствия прямого облучения объектов в помещении. Именно поэтому ошибочно считать q_{wl} прямым теплопоступлением в помещение. В процессе инсоляции происходит поглощение энергии потока солнечного излучения поверхностью массивной стены и соответственно нагрев последней. Увеличение разности температур стены и окружающего воздуха приводит к повышению теплопотерь в окружающую стену.

Рис. 6 позволяет оценить динамику теплового режима контрольных помещений различной пространственной ориентации. При воздействии принятого возмущающего фактора стабилизация температуры воздуха в помещениях T_{in} [33] происходит благодаря слаженной работе системы управления: отклонение регулируемого параметра контроллеры компенсируют изменением положения регулирующих клапанов локальных контуров отопительной системы.

Максимальное отклонение параметра T_{in} от заданного значения $T_{in set}=20$ °С на протяжении цикла моделирования зафиксировано в помещении № 3 (западная ориентация, нижний этаж) на уровне $\Delta T_{in3}=0,092$ °С. Второе по величине отклонение – в помещении № 1 (южная ориентация, нижний этаж) $\Delta T_{in1}=0,023$ °С. Таким образом, полученные данные указывают на следующее противоречие: в помещении № 3 с относительно небольшим влиянием основного возмущающего фактора (40,3 % от интенсивности, характерной для южного направления) наблюдается максимальное отклонение температуры воздуха ΔT_{in3} , на 75 % большее относительно ΔT_{in1} . Такой эффект объясняется несколькими факторами:

1. Взаимное влияние тепловых режимов различных помещений, обусловленное изменением параметров теплоносителя (на рис. 6 для помещений № 3 и 4 заметно первоначальное снижение T_{in}). Стоит отметить, что снижение совпадает по времени с повышением T_{in1} и T_{in2} . Явление объясняется наличием контура циркуляции теплоносителя в отопительной системе: результатом влияния инсоляционных процессов в помещениях № 1 и 2 является повышение температуры теплоносителя в обратном трубопроводе. Далее, согласно заложенному алгоритму функционирования, контроллер ИТП увеличивает долю подмеса воды из обратного трубопровода в

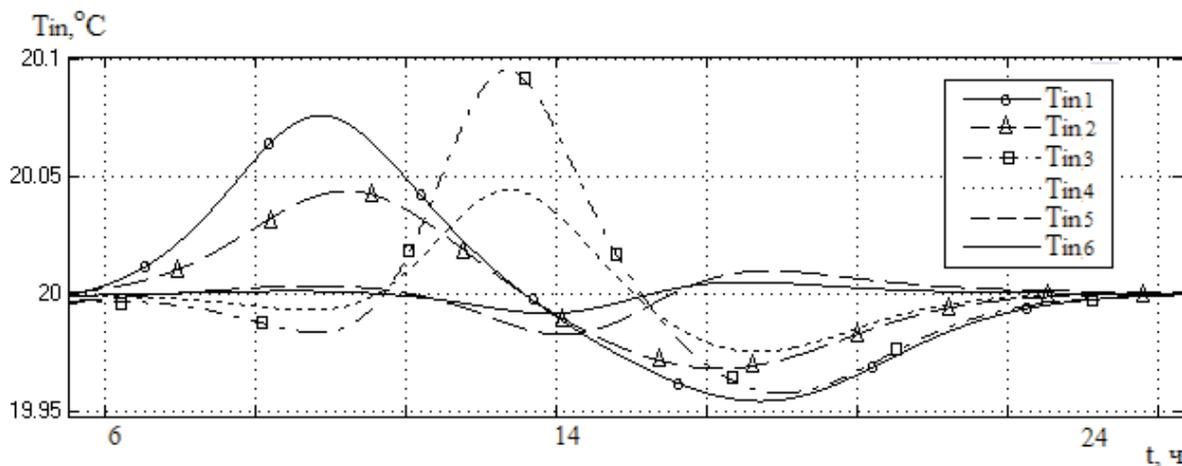


Рис. 6. Изменения температуры воздуха в помещениях при воздействии солнечного излучения: T_{in_i} – температура воздуха внутри i -го помещения, где $i=[1..6]$

Fig. 6. Change in air temperature in buildings affected by solar radiation: T_{in_i} is the air temperature inside the i building, where $i=[1..6]$

контур циркуляции отопительной системы. Следствием этого является снижение температуры подачи теплоносителя в контур (на рис. 7 показатель $T_{sup\ IHP}$) и, соответственно, температуры воздуха в помещениях, не подверженных влиянию солнечного излучения или подверженных в меньшей степени относительно помещения южной ориентации.

2. Различающиеся условия инсоляции (при прочих одинаковых характеристиках поглощения и светопропускания облучаемых поверхностей) обуславливают неравномерность теплопоступлений в течение суток: процесс поглощения

энергии потока солнечного излучения вертикальными поверхностями различной пространственной ориентации характеризуется разными временными характеристиками (время начала и продолжительность облучения), а также интенсивностью потока q_{insol} .

Взаимное влияние указанных факторов оказывает значительное воздействие на климат помещений здания. Описанное выше снижение температур T_{in3} и T_{in4} далее сменяется резким ростом, что объясняется усилением роли второго фактора (инсоляционные теплопоступления в помещения 2-й группы становятся весомыми).

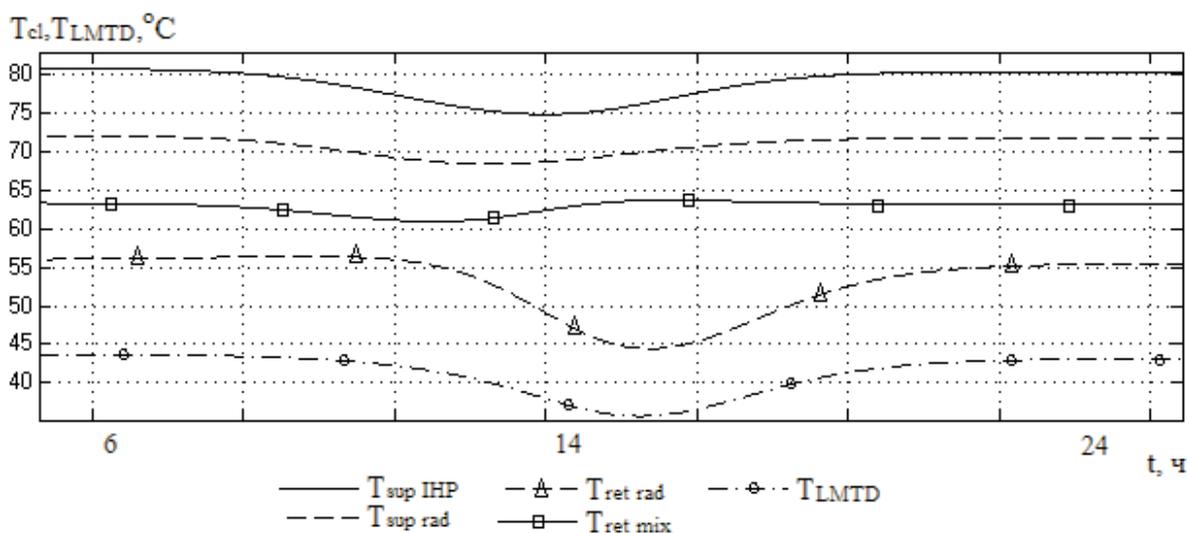


Рис. 7. Изменения температуры поверхности радиатора T_{LMTD} ($^{\circ}C$), а также температуры теплоносителя отопительной системы T_d при влиянии солнечного излучения: $T_{sup\ IHP}$ – в подающем трубопроводе; $T_{sup\ mix}$ и $T_{ret\ rad}$ – на входе и выходе отопительного прибора помещения № 3 соответственно; $T_{ret\ mix}$ – в отходящем трубопроводе помещения № 3

Fig. 7. Change in temperature of radiator surface T_{LMTD} ($^{\circ}C$), as well as the temperature of heating system heat conductor T_d affected by solar radiation: $T_{sup\ IHP}$ – in delivery piping; $T_{sup\ mix}$ and $T_{ret\ rad}$ – at the input and output of the building № 3 heating unit, respectively; $T_{ret\ mix}$ – in off-take piping of the building № 3

На рис. 7 представлены характерные значения температуры теплоносителя в выделенных узлах отопительной системы: подающий и обратный трубопроводы ИТП, обвязка отопительного прибора помещения № 3 (с наибольшими изменениями теплового режима).

На рис. 7 представлена динамика изменения температуры теплоносителя в наиболее важных узлах отопительной системы. Характерный профиль параметра $T_{ret\ rad}$ позволяет сделать вывод о компенсации инсоляционных теплопоступлений. При этом снижение значения температуры воды на выходе радиатора обусловлено повышением расхода теплоносителя через байпас и соответствующим снижением циркуляции через радиатор. Схожим образом реагирует температура поверхности радиатора T_{LMTD} [34]. Анализ профиля температуры возвращаемого теплоносителя $T_{ret\ mix}$ (итоговой после смешивания потоков из радиатора и байпасного канала) позволяет сделать вывод о незначительном влиянии данного параметра на работу отопительной системы и соответственно на тепловой режим здания. Изменение $T_{ret\ mix}$ для системы управления теплопотреблением является возмущающим фактором, в результате действия которого меняется тепловой режим как отдельных помещений (расположенных далее по ходу движения теплоносителя), так и здания в целом.

Особый интерес для специалистов в области проектирования климатических систем представляют исследования энергоэффективности зданий и сооружений. В рамках данной работы дана оценка показателей теплопотребления контрольных помещений Q_{heat} . Анализ динамики параметров Q_{heat} позволяет сделать выводы о потенциале энергосбережения, который может быть достигнут на реальном объекте при внедрении интеллектуальной системы управления теплопотреблением здания [29], способной эффективно компенсировать инсоляционные теплопоступления. Результаты исследований для выбранных контрольных помещений представлены в таблице.

Таблица. Показатели суточного потребления тепловой энергии контрольными помещениями

Table. Indices of daily consumption of heat energy by the controlled buildings

Номер помещения Building number	Номер группы Group number	Ориентация наружных ограждающих конструкций Orientation of outside building envelops	Суточное энергопотребление Q_{heat} , кВт·ч Daily energy consumption, Q_{heat} , kW·h
1	1	Юг/South	41,00
2			41,03
3	2	Запад/West	46,08
4			46,11
5	3	Север/North	47,82
6			47,84

Таким образом, интеллектуальная система управления типа РСУ позволяет сэкономить до

6,84 кВт·ч на теплоснабжении одного помещения за сутки с учетом принятых погодных условий. За базовое значение принято энергопотребление для помещения № 6 северной ориентации $Q_{heat\ rms}$. Максимальный потенциал энергосбережения зафиксирован в помещении южной ориентации (14,3 %). В комнатах западной и восточной ориентации экономия достигает 3,67 % за счет компенсации влияния солнечного излучения.

Выводы

1. С использованием программной среды Simulink математического пакета Matlab разработана комплексная имитационная модель здания, состоящая из источника и системы теплоснабжения, архитектурных конструкций отдельных помещений и здания в целом. Разработан функциональный блок имитации солнечного излучения и тепловых процессов инсоляции помещений на базе приложения Simulink с применением концепции «акаузального» моделирования. Модель позволяет варьировать параметры, учитывающие как условия источника излучения и среды передачи солнечной радиации, так и характеристики процесса поглощения теплопоступлений облучаемыми конструкциями здания.
2. Применение специализированной библиотеки Simscape позволило интегрировать на единой платформе модели реальных объектов, а также интеллектуальной автоматизированной системы управления теплопотреблением здания.
3. Выполнены исследования инсоляционных процессов, характерных для зимних (февраль) климатических условий Западной Сибири. Согласно принятой математической модели дана качественная и количественная оценка процессов поглощения энергии солнечного излучения, поступающей на светопрозрачные и непрозрачные поверхности ограждающих конструкций с различными физическими характеристиками.
4. Описано специфичное влияние инсоляционных теплопоступлений на динамику параметров теплоносителя отопительной системы и воздушной среды помещений с последовательным соединением отопительных приборов. Описать процессы, происходящие при функционировании принятой системы управления, помогли установленные изменения температуры теплоносителя в наиболее важных узлах отопительной системы.
5. При исследовании влияния солнечного излучения на тепловой режим здания максимальное отклонение температуры воздуха от заданной величины составило: для помещения западной ориентации 0,092 °С, южной – 0,023 °С, северной – 0,015 °С.
6. Результаты моделирования доказывают энергетическую эффективность многоконтурной системы управления с распределенной структурой относительно централизованной системы с

одним контуром регулирования. Компенсация инсоляционных теплопоступления позволяет добиться снижения потребления тепловой энергии до 14,3 % или 6,84 кВт·ч на теплоснабжении одного помещения за сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубягин Ю.П., Дубягина О.П., Марченко Е.М. Стратегия национальной безопасности России и ее соотносимость с энергетической безопасностью и ее важными системными составляющими: энергосбережением и водоподготовкой // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – Т. 83. – № 2. – С. 11–16.
2. Парыгин А.Г., Волкова Т.А., Куличихин В.В. О энергонеависимости и надежности тепловых пунктов // Энергетик. – 2013. – № 3. – С. 41–43.
3. Самарин О.Д., Гришнев Е.А. Повышение энергоэффективности зданий на основе интеллектуальных технологий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 5. – С. 12–14.
4. Oldewurtel F., Sturzenegger D., Morari M. Importance of occupancy information for building climate control // Applied energy. – 2013. – V. 101. – № 1. – P. 521–532.
5. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation / J.B. Kim, W.S. Jeong, M.J. Clayton, J.S. Haberl, W. Yan // Automation in construction. – 2015. – V. 50. – № 2. – P. 16–28.
6. Djedjig R., Bozonnet E., Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program // Energy and buildings. – 2015. – V. 86. – № 1. – P. 93–103.
7. Andarini R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design // Energy procedia. – 2014. – V. 47. – P. 217–226.
8. Аваньев В.А., Балужева Л.Н., Гальперин А.Д. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. – М.: Интердиалект, 2003. – 416 с.
9. Зорин Р.Н., Чигарева Ю.С. Обзор опыта строительства зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2012. – № 1. – С. 136–140.
10. Крупнов Б.А. Выбор энергоэффективной системы вентиляции и кондиционирования помещений со значительными теплопоступлениями через светопрозрачные ограждения за счет солнечной радиации и теплопередачи // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 405–410.
11. Ким А.А., Смольянинова Т.А. Оценка инсоляции учебных аудиторий Тихоокеанского государственного университета // Новые идеи нового века – 2014: Матер. 14-ой Междунар. науч. конф. – Хабаровск, 2014. – Т. 2. – С. 405–410.
12. Панферов С.В., Тедегин А.И., Панферов В.И. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – Т. 198. – № 22. – С. 79–86.
13. Потапова Т.А. Критерии оценки энергоэффективности градостроительного комплекса (на примере г. Братска) // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2010. – № 2. – С. 207–209.
14. Пешкичева Н.С. К вопросу инсоляции в городах // Наука и современность. – 2011. – № 9–2. – С. 39–43.
15. Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения. – СПб.: Стройиздат, 1975. – 159 с.
16. Коржнева Т.Г., Ушаков В.Я., Овчаров А.Т. Анализ теплопотерь через системы естественного освещения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 322. – № 4. – С. 56–60.
17. Рымаров А.Г., Ботнар М.И. Зависимость теплопотребления от динамики температуры наружного воздуха в период резкого похолодания // Строительство: наука и образование. – 2014. – № 3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/4_Rymarov.pdf (дата обращения: 20.12.2014).
18. Бахарев Д.В., Орлова Л.Н. О нормировании и расчете инсоляции // Светотехника. – 2006. – № 1. – С. 18–27.
19. Vitucci E.M., Degli-Esposti V., Capriotti L. Ray tracing to predict insolation in urban environment // Proc. of the 2012 IEEE International geoscience and remote sensing symposium. – Munich, 2012. – P. 5848–5851.
20. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. – СПб.: Гидрометеоздат, 1978. – 232 с.
21. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. – СПб.: Гидрометеоздат, 1968. – 215 с.
22. Хейфец А.В. Система автоматизированного расчета продолжительности инсоляции // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. – 2007. – Т. 86. – № 14. – С. 52–54.
23. Сюткин В.В. Моделирование инсоляции земной поверхности в среде ArcGIS // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 7: геология, география. – 2011. – № 4. – С. 126–134.
24. ГОСТ Р 51370–99 Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.
25. СП 23.101.2004. Свод правил «Проектирование тепловой защиты зданий». – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 139 с.
26. Малявина Е.Г., Борщев А.Н. Расчет солнечной радиации в зимнее время // АВОК. – 2006. – № 7. URL: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3374 (дата обращения: 24.12.2014).
27. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ч. 1–6. Вып. 1–34. – СПб.: Гидрометеоздат, 1989–1998.
28. Малявина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.
29. Морозов М.Н., Стрижак П.А. Оценка энергоэффективности однотрубных систем отопления // Энергетик. – 2014. – № 7. – С. 42–45.
30. Broman D., Fritzson P. Higher-order acausal models // Proc. of the 2nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools. – Paphos, 2008. – P. 59–69.
31. Georgescu M., Mezi I. Building energy modeling: A systematic approach to zoning and model reduction using Koopman mode analysis // Energy and buildings. – 2015. – V. 86. – № 1. – P. 794–802.
32. Стрижак П.А., Морозов М.Н. Тепловой режим здания при аварийной работе системы теплоснабжения // Главный энергетик. – 2014. – № 7. – С. 39–45.
33. Анисимов М.В. Тепловая защита чердачного перекрытия многоквартирного жилого здания с нетиповой кровлей при проведении капитального ремонта // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 15–21.
34. Lauenburg P., Wollerstrand J. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure // Proc. of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA). – Glasgow, 2009. – P. 150–158.

Поступила 04.04.2015 г.

UDC 53.043, 536.24.01, 697.134

MATHEMATICAL SIMULATION OF BUILDING THERMAL REGIME INCLUDING SOLAR GAINS**Pavel A. Strizhak,**National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: pavelspa@tpu.ru**Maxim N. Morozov,**National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: tpu_chm@tpu.ru

Simulation models are used by engineers in designing buildings climate systems. Such models are essential for solving a problem of improving energy efficiency of capital construction objects. The model can be applied as a tool for investigating building and constructions energy (energy modelling) when developing the techno-economic justification in the energy management system according with ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use». Solar radiation is one of the major factors affecting the thermal regime of the building. Implementation of the intelligent control system of heat consumption allows increasing energy efficiency in case of maintaining optimal climatic parameters in rooms.

The main aim of the study is to develop the integrated model of building and weather conditions simulation block for carrying out subsequent studies of the solar radiation influence on thermal processes inside the building, as well as for evaluating energy saving potential.

The methods used in the study: simulation using the software package Simulink and special libraries Simscape of «acausal» modeling.

The results. The authors have developed the integrated model of building and investigated the insolation processes typical for climatic parameters of Western Siberia (February). The paper introduces the research results of the indoor air temperature dynamics in the control rooms. The received data on changing the thermal regime of the control room allowed further studying of heat exchange with the environment, as well as determining the effect of solar radiation on heat supply control system functioning. The paper introduces the conclusions on the efficiency of the disturbing factor compensation for achieving energy saving effect.

Key words:

Insolation heat gain, thermal regime of a building, simulation model, heat consumption control system, energy efficiency.

The research was financially supported by the program of competitive growth of the National research Tomsk Polytechnic University within the grants VIU (project VIU_ENIN_2014).

REFERENCES

- Dubyagin Yu.P., Dubyagina O.P., Marchenko E.M. Strategiya natsionalnoy bezopasnosti Rossii i ee sootnosimost s energeticheskoy bezopasnostyu i ee vazhnymi sistemnymi sostavlyayushchimi: energosberezeniem i vodopodgotovkoy [The strategy of national safety of Russia and its correlation with energy security and its important system components: the energy saving and watertreatment]. *Energy saving and water treatment*, 2013, vol. 83, no. 2, pp. 11–16.
- Parygin A.G., Volkova T.A., Kulichihin V.V. O energonezavisimosti i nadezhnosti teplovykh punktov [About energy independence and reliability of heating units]. *Energetik*, 2013, no. 3, pp. 41–43.
- Samarin O.D., Grishneva E.A. Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy na osnove intellektualnykh tekhnologiy [Building energy efficiency improving based on intelligent technologies]. *Energy saving and water treatment*, 2011, no. 5, pp. 12–14.
- Oldewurtel F., Sturzenegger D., Morari M. Importance of occupancy information for building climate control. *Applied energy*, 2013, vol. 101, no. 1, pp. 521–532.
- Kim J. B., Jeong W. S., Clayton M. J., Haberl J. S., Yan W. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in construction*, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 16–28.
- Djedjig R., Bozonnet E., Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and buildings*, 2015, vol. 86, no. 1, pp. 93–103.
- Andarini R. The role of building thermal simulation for energy efficient building design. *Energy procedia*, 2014, vol. 47, pp. 217–226.
- Avan'ev V.A., Balueva L.N., Galperin A.D. *Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Teoriya i praktika* [Ventilation and air-conditioning. Theory and practice]. Moscow, Interdiakt Publ., 2003, 416 p.
- Zorin R.N., Chigareva Yu.S. Obzor opyta stroitelstva zdaniy s bolshoy ploshchadyu svetoprozrachnykh konstruksiy [The review of experience of construction of buildings with big square glazing]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. Series: High-Tech. Ecology*, 2012, no. 1, pp. 136–140.
- Krupnov B.A. Vybor energoeffektivnoy sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya pomeshcheniy so znachitelnyimi teplopostupleniyami cherez svetoprozrachnyye ogradzheniya za schet solnechnoy radiatsii i teploperedachi [Selection of energy efficient ventilating and air conditioning system of premises with sufficient heat ingress through transparent enclosures by solar radiation and heat transfer]. *Academia. Architecture and Construction*, 2010, no. 3, pp. 405–410.
- Kim A.A., Smolyaninova T.A. Otsenka insolyatsii uchebnykh auditoriy Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta [Assessment of insolation classrooms pacific national university]. *Novye idei novogo veka-2014. Materialy 14 Mezhdunarodnoy konferentsii* [The new Ideas of New Century-2014: The 14th International Scientific Conf. Proc.]. Khabarovsk, 2014. Vol. 2, pp. 405–410.
- Panferov S.V., Tedegin A.I., Panferov V.I. Nekotorye problemy energosberezeniya i avtomatizatsii v sistemakh teplosnabzheniya zdaniy [Some problems of energy saving and automation of buildings heat systems]. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2010, vol. 198, no. 2, pp. 79–86.

13. Potapova T.A. Kriterii otsenki energoeffektivnosti gradostroitel'nogo kompleksa (na primere g. Bratska) [Energy efficiency assessment criteria of urban complex (on example the Bratsk city)]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2010, no. 2, pp. 207–209.
14. Peshkicheva N.S. K voprosu insolyatsii v gorodakh [On the issue of insolation in cities]. *Nauka i sovremennost*, 2011, no. 9–2, pp. 39–43.
15. Chistovich S.A. *Avtomaticheskoe regulirovanie rashkoda tepla v sistemakh teplosnabzheniya* [Automatic control of heat consumption in heat supply systems]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1975. 159 p.
16. Korzhneva T.G., Ushakov V.Ya., Ovcharov A.T. Anaiz teplopoter cherez sistemy estestvennogo osveshcheniya [Analysis of heat losses through daylight illumination systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 322, no. 4, pp. 56–60.
17. Rymarov A.G., Botnar M.I. Zavisimost teplopotrebleniya ot dinamiki temperatury naruzhnogo vozdukh v period rezkogo pokholodaniya [Dependence of heat consumption on the dynamics of external air temperature during cold snap periods]. *Construction: Science and Education*, 2014, no. 3. Available at: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/4_Rymarov.pdf (accessed 20 December 2014).
18. Bakharev D.V., Orlova L.N. O normirovanii i raschete insolyatsii [About normalization and calculation of insolation]. *Light and Engineering*, 2006, no. 1, pp. 18–27.
19. Vitucci E.M., Degli-Esposti V., Capriotti L. Ray tracing to predict insolation in urban environment. *Proceedings of the 2012 IEEE International geoscience and remote sensing symposium*. Munich, 2012, pp. 5848–5851.
20. Kondratev K.Ya., Pivovarova Z.I., Fedorova M.P. *Radiatsionnyy rezhim naklonnykh poverkhnostey* [The radiation regime of the angled surfaces]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 232 p.
21. Sivkov S.I. *Metody rascheta kharakteristik solnechnoy radiatsii* [Methods for computing solar radiation characteristics]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 215 p.
22. Kheyfets A.V. Sistema avtomatizirovannogo rascheta prodolzhitel'nosti insolyatsii [Computer calculation system of the sunshine duration]. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Construction engineering and architecture*, 2007, vol. 86, no. 14, pp. 52–54.
23. Syutkin V.V. Modelirovanie insolyatsii zemnoy poverkhnosti v srede ArcGIS [Modeling insolation of a terrain in ArcGIS software environment]. *Vestnik of St. Petersburg State University, Series 7. Geology. Geography*, 2011, no. 4, pp. 126–134.
24. GOST R 51370–99. *Metody ispytaniy na stoykost k klimaticheskim vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdeliy. Ispytanie na vozdeystvie solnechnogo izlucheniya* [State Standard R 51370–99. Climatic environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test for influence of solar radiation]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 p.
25. SP 23.101.2004. *Svod pravil «Proektirovanie teplovoj zashchity zdaniy»* [Rulebook «Designing buildings thermal protection»]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2004. 139 p.
26. Malyavina E.G., Borshchev A.N. Raschet solnechnoy radiatsii v zimnee vremya [Calculation of solar radiation in winter]. *ABOK*, 2006, no. 7. Available at: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3374 (accessed 24 December 2014).
27. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Reference book on the USSR climate]. P. 1–6, Iss. 1–34, St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1989–1998.
28. Malyavina E.G. *Teplopoteri zdaniya: spravochnoe posobie* [Heat loss of the building: resource book]. Moscow, ABOK-PRESS, 2007. 144 p.
29. Morozov M.N., Strizhak P.A. Otsenka energoeffektivnosti odnotrubnykh sistem otopeniya [Energy efficiency analysis of single-pipe heating system]. *Energetik*, 2014, no. 7, pp. 42–45.
30. Broman D., Fritzon P. Higher-order acausal models. Proceedings of the «2-nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools». *Paphos*, Cyprus, July 8, 2008, pp. 59–69.
31. Georgescu M., Mezi? I. Building energy modeling: A systematic approach to zoning and model reduction using Koopman mode analysis. *Energy and buildings*, 2015, vol. 86, no.1, pp. 794–802.
32. Strizhak P.A., Morozov M.N. Teplovoy rezhim zdaniya pri avariynoy rabote sistemy teplosnabzheniya [Building thermal mode in case of emergency termination of heat supply]. *Glavny energetik*, 2014, no. 7, pp. 39–45.
33. Anisimov M.V. Teplovaya zashchita cherdachnogo perekrytiya mnogokvartirnogo zhilogo zdaniya s netipovoy krovley pri provedenii kapitalnogo remonta [Thermal protection shield of attic floor when repairing multi-apartment building with nonstandard roofing system]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 15–21.
34. Lauenburg P., Wollerstrand J. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure. *Proceedings of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA)*. Glasgow, Scotland, 2009. pp. 150–158.

Received: 04 April 2015.

УДК 552.321.6:552.11

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ ДУНИТОВ КИНГАШСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии
Геолого-географического факультета Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Чернышов Алексей Иванович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии
Геолого-географического факультета Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: aich@ggf.tsu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования многочисленных потенциально рудоносных ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых массивов Канской глыбы Восточного Саяна с целью совершенствования региональных схем корреляции, а также выявления в них Pt-Cu-Ni оруденения. Один из таких массивов – Кингашский, включающий в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение, открытое еще в советское время, является объектом настоящего исследования. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к данному массиву, остаются до конца нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации в нем руд.

Цель работы: оценка температурного режима формирования кумулятивных дунитов Кингашского ультрамафитового массива путем применения известных в геологической литературе оливин-хромшпинелиевых геотермометров.

Методы исследования: петрографическая характеристика пород на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss, химический состав оливинов и хромшпинелидов по результатам исследования на электронном сканирующем микроскопе Camscan с энергодисперсионной и волнодисперсионной приставками. Расчет температур равновесной кристаллизации с применением версий оливин-хромшпинелиевых геотермометров Джексона-Ирвайна-Родера, Оно, Фабри, О'Нейла-Уолла-Бэллхауза-Берри-Грина (O'NWBBG).

Результаты. С использованием оливин-хромшпинелиевых геотермометров смоделированы температурные режимы формирования кумулятивных дунитов Кингашского ультрамафитового массива. Расчетная равновесная кристаллизация кумулятивных дунитов массива соответствует температурам 1135...1300 °С. При этом полученный пониженный диапазон температур по геотермометрам Джексона-Ирвайна-Родера и Фабри, равный 600...700 °С, отражает температуры наложенного на данные породы среднетемпературного метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, который широко проявился в Канской глыбе Восточного Саяна.

Ключевые слова:

Кингашский массив, геотермометр, оливин, хромшпинелид, равновесная кристаллизация, температурный режим.

Введение

В последние несколько десятилетий стали появляться новые данные по Pt-Cu-Ni оруденению, связанному с различными типами ультрамафит-мафитовых формаций разновозрастных подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии, охватывающих обширную территорию Южной Сибири, Казахстана, Монголии и Северного Китая [1–7], что представляет широкий научный и практический интерес. На территории Канской глыбы Восточного Саяна при проведении в 60–80-х гг. XX в. геолого-съёмочных и прогнозно-металлогенических работ были выявлены многочисленные тела ультрамафитовых и мафит-ультрамафитовых интрузий, в которых неоднократно отмечалась рудная минерализация меди, никеля и благородных металлов [2, 8, 9]. Они картируются в виде многочисленных массивов, чаще небольших размеров, и привлекают внимание многих исследователей в

связи с их потенциальной рудоносностью [6, 8–12]. Однако формационная принадлежность и металлогеническая специализация данных объектов часто оказываются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Один из таких массивов – Кингашский, включающий в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение, является объектом настоящего исследования. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к массиву, остаются до конца нерешёнными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, а также условий формирования и локализации в нем руд.

Целью настоящего исследования явилась оценка температурного режима формирования кумулятивных дунитов массива, путем применения известных в геологической литературе оливин-хромшпинелиевых геотермометров.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кингашский ультрамафитовый массив (AR₂-PR₁) расположен в пределах зеленокаменного пояса Канской глыбы Восточного Саяна и включает в себя одноименное крупное Pt-Cu-Ni месторождение [13–15, 9]. В плане массив картируется в виде линзовидной интрузии (3×0,7 км), имеющей согласное залегание со структурой пород обрамления, и обнаруживает тектонические контакты с вмещающей толщей (рис. 1). Он сложен ультрамафитами и габброидами, со значительным преобладанием первых. Ультрамафиты представлены преимущественно кумулятивными дунитами, при этом верлиты и пикриты пользуются ограниченным распространением. Они не обнаруживают какого-либо закономерного расположения в массиве, а распределяются хаотично. Можно предположить, что образование ультрамафитового тела осуществлялось в магматической камере в условиях активной тектонической обстановки, когда режим сжатия периодически сменялся растяжением. В моменты растяжения, очевидно, происходило пульсационное внедрение в камеру по образовавшимся в ней ослабленным зонам неоднородных по составу ультраосновных расплавов, которые возникли в результате магматической дифференциации в глубинных промежуточных магматических очагах [15]. Габброиды, перекрывающие ультрамафиты, предположительно, представляют собой последующую, оторванную по времени, фазу внедрения, при этом наблюдаемые на контакте ультрамафитов и габброидов клинопироксениты, вероятно, являются реакционными образованиями [10].

Оценка температур оливин-хромшпинелиевых равновесий

Доказано, что хромшпинелиды – одна из первых минеральных фаз кристаллизации ультраосновных расплавов, из которых они выделяются до или совместно с магнезиальным оливином (намного реже – с другими силикатными минералами). При этом магмагенная природа первых в магматических ультрамафитовых телах подтверждается морфологией зерен, характером их распределения, взаимоотношением с другими минеральными фазами, наличием в них первичных расплавных включений. Поэтому для большинства ультрамафитов наиболее характерен оливин-хромшпинелиевый парагенезис, который, учитывая особенности составов хромшпинелидов, может использоваться в качестве индикатора условий образования ультраосновных пород.

Температуры кристаллизации хромшпинелидов в ультраосновных расплавах могут быть оценены при экспериментальных исследованиях или расчетным путем.

Так, например, экспериментально было установлено [16], что из расплава оливинового базальта с широкими вариациями содержания хрома шпинель (шпинель-магнетитовый твердый раствор) в качестве ликвидусной фазы появляется при T=1275...1058 °C. При этом в более окислительных условиях первой кристаллизуется шпинель, при восстановительном режиме одновременно с ней появляется оливин, клинопироксен и плагиоклаз. Совместная кристаллизация фаз хромшпинелид-оливинового парагенезиса может происходить в широком температурном интервале (от ликвидуса системы до 40...50 % раскristаллизации).

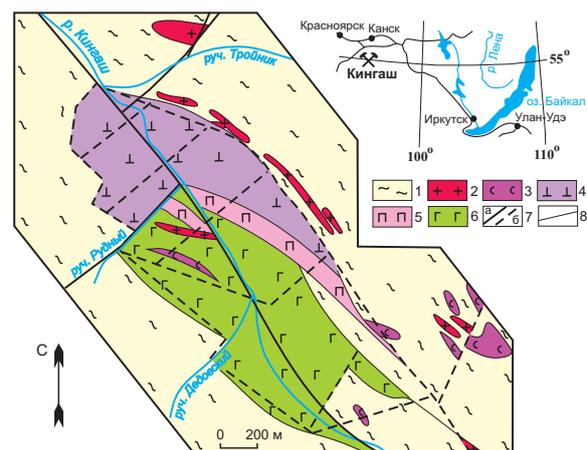


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кингашского мафит-ультрамафитового массива (составлена Н.А. Третьяковым, В.А. Прохоровой, в редакции авторов): 1 – вмещающие породы: гнейсы, амфиболиты, мраморы; 2 – гранитоиды; 3 – серпентиниты; 4 – ультрамафиты; 5 – клинопироксениты; 6 – габброиды; 7 – тектонические нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые; 8 – геологические границы

Fig. 1. Schematic geological map of Kingashsky mafite-ultramafic massif (made by N.A. Tret'yakov, V.A. Prokhorova, ed. by the authors): 1 are the adjacent formations: gneiss, amphibolite, marble; 2 are the granitoids; 3 are the serpentinites; 4 are the ultramafites; 5 are the clinopyroxenites; 6 are the gabbroids; 7 are the tectonic faults: a) proved, b) probable; 8 are the geological boundaries

Для косвенного определения температур кристаллизации ультраосновных расплавов в настоящее время в литературе широко используются главным образом четыре оливин-хромшпинелиевых геотермометра: Джексона–Ирвайна–Родера [17, 18], Оно [19], Фабри [20] и О'Нейла–Уолла–Бэллхауза–Берри-Грина (O'NWBBG) [21].

Как было выяснено ранее [22], расчетные температуры оливин-хромшпинелиевого равновесия отвечают не образованию дунитов и хромититов, а становлению сложенных ими тел. Поэтому все основания предполагать постоянство значений «замороженной» температуры в пределах каждого тела независимо от вариаций состава оливина и хромшпинелида (прежде всего, его железистости). Этот вывод служит надежным индикатором корректности любого, основанного на обменных реакциях, геотермометра.

Для оценки температур формирования ультрамафитов Кингашского массива были использованы образцы неизмененных кумулятивных дунитов. При этом для «чистоты» расчетов авторами выбирались наиболее тесные парагенезисы хромшпинели и оливина, а именно микровключения первого минерала в составе второго (рис. 2). В результате проведенных расчетов полученные температуры с использованием одного геотермометра показывают очень близкие значения. Однако интервал значений температур, полученных по разным геотермометрам, является значительным (табл. 1).

Рассчитанные температуры по оливин-хромшпинелиевым геотермометрам Джексона-Ирвайна-Родера и Фабри характеризуются близкими значениями и отвечают преимущественно температурному интервалу 600...700 °С. Температуры, полученные по версии геотермометра О'Нейла-Уолла-Бэллхауза-Берри-Грина, дают меньший интервал значений и соответствуют 540...565 °С. Однако данный температурный порог представляется авторам несколько заниженным.

Авторы склонны предполагать, что температуры, полученные по данным трем оливин-хромшпинелиевым геотермометрам, отражают температуры наложенного на массив метаморфизма (эпидот-амфиболитовая фация метаморфизма широко проявлена на данной площади [23]), в ходе которого

оливин-хромшпинелиевая ассоциация испытала переуравновешивание. Это, вероятно, обусловлено тем, что разработчики данных геотермометров производили практическую апробацию своих версий на ультрамафитах из офиолитовых комплексов, являющихся реститовыми образованиями.

Однако температурный интервал 1135...1300 °С, полученный по геотермометру Оно, хорошо согласуется с температурами кристаллизации кумулятивных дунитов, предложенных ранее Т.А. Радомской (Т=1100...1260 °С) [24].

Столь хорошая применимость данной версии геотермометра А. Оно, очевидно, может быть обусловлена введением в формулу расчета значения хромистости (Cr³⁺), которое обнаруживает зависимость от степени метаморфизма и, очевидно, при расчетах температурного режима учитывает его воздействие.

Выводы

Через существующие версии оливин-хромшпинелиевых геотермометров смоделированы температурные режимы формирования кумулятивных дунитов Кингашского массива. Полученные данные указывают на магматический генезис данных пород, осложненный метаморфизмом, и позволяют предположить, что расчетная равновесная кристаллизация кумулятивных дунитов массива соответствует температурам 1135...1300 °С. Эти данные

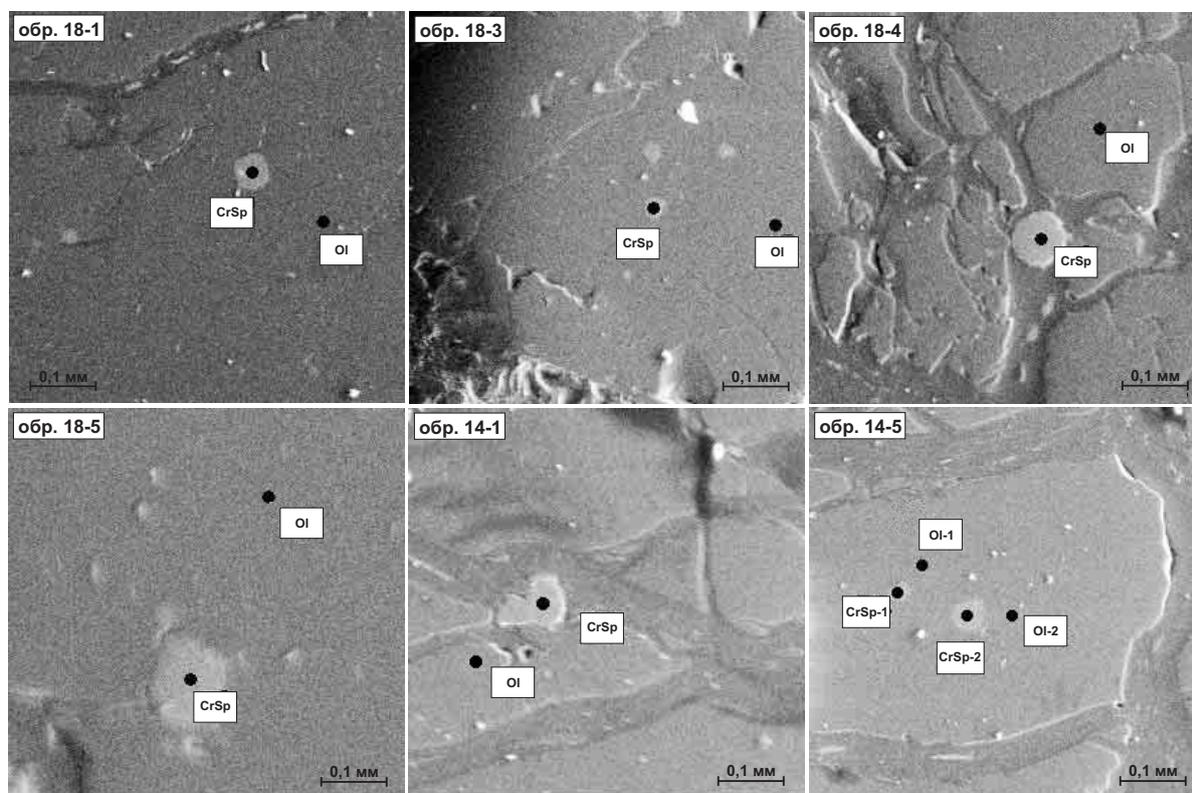


Рис. 2. Примеры оливин-хромшпинелиевых парагенезисов в исследованных образцах кумулятивных дунитов Кингашского массива: Ol – застрел оливина; CrSp – застрел хромшпинели

Fig. 2. Examples of olivine-chrome-spinel paragenesis in the examined samples of cumulative dunites from Kingashsky massif: Ol is the point of analysis of olivine; CrSp is the point of analysis of olivine

Таблица. Расчет температур оливин-хромшпинелиевого равновесия в образцах кумулятивных дунитов на Кингашском месторождении**Table.** Calculation of temperatures of olivine-chrome-spinel equilibrium in the samples of cumulative dunites in Kingashsk deposit

Образец/Sample	18-1	18-1	18-2	18-3	18-4	18-4	18-5	18-5	14-1	14-5	14-5
Хромшпинель/Chrome-spinel											
MgO	10,07	10,93	10,19	10,81	10,22	10,25	11,43	11,23	10,19	10,67	10,41
Al ₂ O ₃	31,24	33,61	31,13	33,17	29,91	31,70	35,53	35,45	32,46	31,98	33,31
Cr ₂ O ₃	34,01	30,55	33,76	31,86	35,23	30,36	28,97	29,67	31,43	31,51	30,73
Fe ₂ O ₃	3,32	3,99	3,16	3,66	2,58	6,80	3,77	3,41	3,90	4,91	4,47
FeO	21,25	20,43	21,37	20,87	21,34	21,03	20,09	20,59	21,63	21,16	21,53
MnO	0,44	0,59	0,40	–	–	0,53	0,39	–	–	–	–
TiO ₂	–	0,29	0,31	–	0,34	–	0,20	–	0,36	0,26	–
Оливин/Olivine											
SiO ₂	39,81	40,05	39,87	40,26	39,78	40,24	39,70	40,10	39,88	40,20	40,36
FeO	12,24	12,04	12,64	12,10	12,01	12,26	12,19	12,29	12,61	12,42	12,79
MnO	0,18	–	–	0,24	0,24	0,07	0,25	–	–	–	–
MgO	47,78	47,91	47,49	47,41	47,25	47,14	47,87	47,61	46,92	47,39	46,84
NiO	–	–	–	–	0,34	0,29	–	–	0,58	–	–
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	0,12	–	–	–	–	–	–
Рассчитанные по геотермометрам температуры, °C/Calculated by temperature geothermometer, °C											
1	541	550	551	545	554	563	546	535	538	564	539
2	602	617	616	617	611	610	630	621	603	624	613
3	666	669	676	671	674	690	669	661	662	689	671
4	1143	1233	1170	1213	1134	1187	1301	1276	1185	1209	1218

Примечание: 1–4 – авторские версии геотермометров: 1 – О'Нейла–Уолла–Бэллхауза–Берри–Грина (O'NWBBG) [21], $T, K = [(6530 + 280 \cdot P + 7000 + 108 \cdot P) \cdot (1 - 2 \cdot Fa) - 1960 \cdot (1 - 2 \cdot f) + 16150 \cdot \alpha + 25150 \cdot (\gamma + X_{Cr})] / (R \cdot \ln K_D + 4,705)$; 2 – Джексона–Ирвайна–Родера [17, 18], $T, K = (3480 \cdot 2\alpha + 1018 \cdot \beta + 2400 - 1720 \cdot \gamma) / (2,23 \cdot \alpha + 2,56 \cdot \beta + \ln K_D \cdot 1,987 - 3,08 \cdot \gamma - 1,47)$; 3 – Фабри [20], $T, K = (4250 \cdot \alpha + 1343) / (\ln K_D + 1,825 \cdot \alpha + 0,571)$; 4 – Оно [19], $T, K = (0,057 + 0,34 \cdot 10^4) / (\ln K_D + 0,934 \cdot Cr'' - 0,102)$; P – давление в GPa, для расчетов принято равным 1 GPa; α, β, γ – атомные доли Cr, Al, Fe³⁺ по отношению к их сумме в хромшпинелиде, соответственно; $Cr'' = Cr / (Cr + Al)$ в хромшпинелиде; $Fa = Fe / (Fe + Mg)$ в оливине; $f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$ в хромшпинелиде; $K_D = (X_{Mg}^{ol} \cdot f) / (X_{Mg}^{sp} \cdot Fa)$, где $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe)$ в оливине и хромшпинелиде, соответственно; $K_D^0 = \ln K_D - 4 \cdot \gamma$; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

Note: 1–4 are the author's versions of geothermometers: 1 – O'Neil–Wall–Ballhaus–Berry–Green (O'NWBBG) [21], $T, K = [(6530 + 280 \cdot P + 7000 + 108 \cdot P) \cdot (1 - 2 \cdot Fa) - 1960 \cdot (1 - 2 \cdot f) + 16150 \cdot \alpha + 25150 \cdot (\gamma + X_{Cr})] / (R \cdot \ln K_D + 4,705)$; 2 – Jackson–Irvine–Roeder [17, 18], $T, K = (3480 \cdot 2\alpha + 1018 \cdot \beta + 2400 - 1720 \cdot \gamma) / (2,23 \cdot \alpha + 2,56 \cdot \beta + \ln K_D \cdot 1,987 - 3,08 \cdot \gamma - 1,47)$; 3 – Fabries [20], $T, K = (4250 \cdot \alpha + 1343) / (\ln K_D + 1,825 \cdot \alpha + 0,571)$; 4 – Ono [19], $T, K = (0,057 + 0,34 \cdot 10^4) / (\ln K_D + 0,934 \cdot Cr'' - 0,102)$; P – pressure in GPa, it is accepted equal to 1 GPa for calculation; α, β, γ – atomic fractions of Cr, Al, Fe³⁺ relative to their sum in chrome-spinel, respectively; $Cr'' = Cr / (Cr + Al)$ in chrome-spinel; $Fa = Fe / (Fe + Mg)$ in olivine; $f = Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg)$ in chrome-spinel; $K_D = (X_{Mg}^{ol} \cdot f) / (X_{Mg}^{sp} \cdot Fa)$, where $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe)$ in olivine and in chrome-spinel, respectively; $K_D^0 = \ln K_D - 4 \cdot \gamma$; R – absolute gas constant, $R = 8,31$ J/(mole·K).

хорошо сопоставляются с ранее сформулированным Т.А. Радомской температурным интервалом, отвечающим $T = 1100 \dots 1260$ °С.

На последующем этапе геологической истории ультрамафиты Кингашского массива испытали

воздействие наложенного среднетемпературного ($T = 600 \dots 700$ °С) метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, в результате которого произошло переуравновешивание оливин-хромшпинелиевого парагенезиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология и перспективы сульфидного Pt-Cu-Ni оруденения Восточной части Алтае-Саянской складчатой области / С.С. Сердюк, В.А. Кириленко, Г.Р. Ломаева, В.Е. Бабушкин, А.В. Тарасов, А.И. Зверев. – Красноярск: Изд-во «Город», 2010. – 184 с.
- Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы / Л.В. Агафонов, Ж. Лхамсурэн, К.С. Кужугет, Ч.К. Ойдул. – Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, 2005. – 224 с.
- Поляков Г.В., Изох А.Э., Кривенко А.П. Платиноносные ультрамафит-мафитовые формации подвижных поясов Центральной и Юго-Восточной Азии // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 12. – С. 1227–1241.
- Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
- Черкасова Т.Ю., Мазуров А.К., Чернышов А.И. Потенциальная рудоносность расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов Нижнедербинского комплекса (СЗ Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 20–27.
- Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China / J. Lehmann, N. Arndt, B. Windley,

- М.-F. Zhou, С.У. Wang, С. Harris // *Econ. Geol.* – 2007. – V. 102. – P. 75–94.
8. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богнибова, А.П. Кривенко, А.Э. Исоха и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
 9. Юричев А.Н. Эволюция сульфидного расплава в процессе образования Кингашского ультрамафитового массива (северо-запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета.* – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 56–63.
 10. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // *Геохимия.* – 2010. – № 2. – С. 1–25.
 11. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и проблемы рудоносности // *Геология и геофизика.* – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 219–236.
 12. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // *Известия Томского политехнического университета.* – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
 13. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
 14. Путеводитель по Кингашскому месторождению медно-никелевых и благороднометалльных руд (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.П. Романов, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин, Г.И. Шведов, Н.А. Третьяков, И.Г. Резников, В.В. Некос. – Красноярск: КНИИГиМС, 2001. – 72 с.
 15. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков, П.А. Балыкин, Н.И. Кузватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова // *Платина России. Проблемы развития, оценки, воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов: сб. науч. трудов.* Т. V. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – С. 152–175.
 16. Hill R., Roeder P. The crystallization of spinel from liquid as a function of Oxygen fugacity // *J. of Geol.* – 1974. – V. 92. – № 6. – P. 709–731.
 17. Irvine T.N. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 2. Petrologic applications // *Can. J. Earth Sci.* – 1967. – V. 4. – P. 71–103.
 18. Roeder P., Campbell I., Jamieson H. A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1979. – V. 68. – P. 325–334.
 19. Ono A. Fe-Mg partitioning between spinel and olivine // *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* – 1983. – V. 78. – P. 115–122.
 20. Fabries J. Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes // *Contrib. Miner. and Petrol.* – 1979. – V. 69. – № 4. – P. 329–336.
 21. Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1991. – V. 107. – № 1. – P. 27–40.
 22. ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермометрии хромитовых ультрамафитов Урала / И.С. Чащухин, С.Л. Вотьяков, С.Г. Уймин, Д.Р. Борисов, В.Н. Быков. – Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 1996. – 136 с.
 23. Зеленокаменные пояса юго-западного обрамления Сибирской платформы и их металлогения / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханин, В.Н. Князев, С.К. Шарифулин. – Красноярск: КНИИГиМС, 2004. – 176 с.
 24. Радомская Т.А. Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 23 с.

Поступила 05.06.2015 г.

UDC 552.321.6:552.11

SIMULATION OF FORMATION TEMPERATURE OF DUNITES FROM KINGASHSKY ULTRAMAFIC MASSIF (NORTH-WESTERN PART OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

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

Alexey I. Chernyshov,

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

Relevance of the work is caused by the need of detailed petrological studies of numerous potentially mineralized ultramafic and mafic-ultramafic massifs of the Kan block of the Eastern Sayan to improve the correlation of regional schemes, and to identify Pt-Cu-Ni mineralization in them. One of these massifs – Kingashsky massif, including eponymous large Pt-Cu-Ni deposit, discovered in Soviet time, is the subject of this study. However, despite the increased interest of researchers to this massif, there are unresolved issues on the depth of its formation, comagmatic ultramafic and mafic rocks and conditions of formation and localization of ore in it.

The main aim of the study is to assess temperatures of formation of cumulative dunites in Kingashsky ultramafic massif applying known in geological literature olivine-chromspinelide geothermometers.

The methods used in the study: petrographic characteristics of rocks on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss, chemical composition of minerals on the scanning electron microscope Camscan, equipped with energy-dispersive and wave-dispersive spectrometers.

The results. Temperature conditions of formation of cumulative dunites in Kingashsky ultramafic massif through existing versions of olivine-chromspinelide geothermometers are simulated. The estimated equilibrium crystallization of cumulative dunites from massif corresponds to temperatures 1135...1300 °C. At the same time the calculated range of reduced temperatures on geothermometers of Jackson-Irvine-Roeder and Fabries, equal 600... 700 °C, reflects temperatures of medium-temperature metamorphism of epidote-amphibolite facies, imposed on these rocks, which is widely manifested in the Kan block of Eastern Sayan.

Key words:

Kingashsky massif, geothermometer, olivine, chromspinelide, equilibrium crystallization, temperature regime.

REFERENCES

- Serdyuk S.S., Kirilenko V.A., Lomaeva G.R., Babushkin V.E., Tarasov A.V., Zverev A.I. *Geologiya i perspektivy sulfidnogo Pt-Cu-Ni orudneniya Vostochnoy chasti Altae-Sayanskoy skladochtoy oblasti* [Geology and prospects of sulfide Pt-Cu-Ni mineralization of eastern part of the Altay-Sayan folded area]. Krasnoyarsk, Gorod Publ., 2010. 184 p.
- Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oydup Ch.K. *Platinosnost ultramafit-mafitov Mongolii i Tuvy* [Ultramafic-mafic PGE of Mongolia and Tuva]. Ulaanbaatar, Mongolian University of Science and Technology, 2005. 224 p.
- Polyakov G.V., Izokh A.E., Krivenko A.P. *Platinosnyye ultramafit-mafitovyye formatsii podvzhnykh poyasov Tsentralnoy i Yugo-Vostochnoy Azii* [Pt-bearing ultramafic-mafic formations of mobile belts in Central and South-Eastern Asia]. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1227–1241.
- Yurichev A.N. *Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana* [Mafic-ultramafic magmatism of Kansk block and its ore potential, NW Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I. *Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana)* [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (north-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
- Cherkasova T.Yu., Mazurov A.K., Chernyshov A.I. *Potentsialnaya rudonosnost rassloennykh mafit-ultramafitovykh massivov Nizhnederbinskogo kompleksa* [Potential ore-bearing of layered mafic-ultramafic massifs of the Nizhnederbinsky complex (NW Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 20–27.
- Lehmann J., Arndt N., Windley B., Zhou M.-F., Wang C.Y., Harris C. *Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China*. *Econ. Geol.*, 2007, vol. 102, pp. 75–94.
- Platinosnost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri* [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. V.I. Bog-nibova, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, Branch «Geo», 1995. 151 p.
- Yurichev A.N. *Evolutsiya sulfidnogo rasplava v protsesse obrazovaniya Kingashskogo ultramafitovogo massiva (severo-zapad Vostochnogo Sayana)* [Evolution of sulfide liquid during formation of the Kingashsky ultramafic massif (north-west of Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 56–63.
- Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. *Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochny Sayan)* [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochemistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. *Talazhinsky plagiodunit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosnosti* [The Talazhin plagiodunit-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I. *Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-garzburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana)* [Ore mineralization of the Idarsky dunite-harzburgite complex (North-west Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
- Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platinoidno-medno-nikelevoe mestorozhdenie* [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Press, 2003. 192 p.
- Kornev T.Ya., Romanov A.P., Knyazev V.N., Sharifulin S.K., Shvedov G.I., Tretyakov N.A., Reznikov I.G., Nekos V.V. *Putevoditel po Kingashskomu mestorozhdeniyu medno-nikelevykh i blagorodnometallnykh rud (Vostochnyy Sayan)* [Guide to Kingashsky deposit of copper-nickel and noble metal ores (Eastern Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2001. 72 p.
- Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovатов N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. *Kingashsky mafit-ultramafitovy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvennyy sostav i petrostrukturnyy analiz ultramafitov (Vostochny Sayan)*. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki vosproizvodstva i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syryevoy bazy platinovykh metallov* [Kingashsky mafic-ultramafic massif: geological position, internal structure, material composition analysis and petrostructural analysis of ultramafic (Eastern Sayan). *Platinum of Russia. Problems of development, evaluation of reproduction and complex use of mineral resources base of the platinum metals.*] Moscow, Geoinformmark Publ., 2004, V. V, pp. 152–175.
- Hill R., Roeder P. *The crystallization of spinel from liquid as a function of Oxygen fugacity*. *J. of Geol.*, 1974, vol. 92, no. 6, pp. 709–731.
- Irvine T.N. *Chromian spinel as a petrogenetic indicator. 2. Petrologic applications*. *Can. J. Earth Sci.*, 1967, vol. 4, pp. 71–103.
- Roeder P., Campbell I., Jamieson H. *A re-evaluation of the olivine-spinel geothermometer*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, vol. 68, pp. 325–334.
- Ono A. *Fe-Mg partitioning between spinel and olivine*. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, 1983, vol. 78, pp. 115–122.
- Fabries J. *Spinel-olivine Geothermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes*. *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1979, vol. 69, no. 4, pp. 329–336.
- Ballhaus C., Berry R., Green D. *High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implication for the oxidation state of the upper mantle*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, vol. 107, no. 1, pp. 27–40.
- Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Uimin S.G., Borisov D.R., Bykov V.N. *YaGR-spektroskopiya khromshpinelidov i problemy oksiternobarometrii khromitonosnykh ultramafitov Urala* [Moesbauer spectroscopy of chromospinelides and problems of oxy-termbarometer of chromite-bearing ultramafites of the Ural]. Ekaterinburg, Institute of geology and geochemistry UrO RAN, 1996. 136 p.
- Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Knyazev V.N., Sharifulin S.K. *Zelenokamennyye poyasa yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy i ikh metallogeniya* [Greenstone belts of southwestern framing of the Siberian platform and their metallogeny]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Press, 2004. 176 p.
- Radomskaya T.A. *Mineralogiya i geokhimiya Kingashskogo platinoidno-medno-nikelevogo mestorozhdeniya (V. Sayan)*. Avtoref. Kand. nauk [Mineralogy and geochemistry of the Kingashsky PGE-copper-nickel deposit (E. Sayan). Cand. Sc. Abstract]. Irkutsk, 2012. 23 p.

Received: 05 June 2015.

УДК 624.131

ОПТИМАЛЬНОЕ (ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ) ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЯ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Сабденов Каныш Оракбаевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и теоретической физики
Физико-технического факультета Евразийского национального
университета им. Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан,
010008, г. Астана, ул. Мунайтпасова, 5. E-mail: sabdenovko@yandex.kz

Байтасов Талгат Маратович,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Технология промышленного
и гражданского строительства», декан архитектурно-строительного
факультета Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева,
Республика Казахстан, 010008, г. Астана, ул. Мунайтпасова, 5.
E-mail: baitasov_tm@enu.kz

Цель работы: найти условия достижения минимума потерь энергии при обогреве здания в системе центрального отопления.

Актуальность исследования. Быстро растущее мировое энергопотребление уже вызывает беспокойство из-за трудностей, возникающих при поставке энергии, истощения энергетических ресурсов и тяжелого воздействия на окружающую среду (разрушение озонового слоя, глобальное потепление, изменение климата и др.). Для решения возникающих проблем необходимо точное физическое и математическое моделирование транспорта и потребления энергии. Анализ такой модели с применением методов теории оптимизации позволит найти наилучшие решения снабжения энергией.

Методы исследований: анализ и обобщение ранее полученных теоретических результатов и формулировка новых подходов.

Результаты. Представлен краткий обзор стратегии и методов эффективного обеспечения энергией общественных, коммерческих и жилых зданий. Основное внимание уделяется системе центрального теплоснабжения. Обеспечение энергоэффективного теплоснабжения рассматривается как математическая минимаксная задача. Сформулирована задача оптимизации теплоснабжения здания, подключенного к системе центрального отопления. Критерием оптимальности является поддержание внутри здания комфортной температуры и минимум потерь энергии. Найдены простейшие частные решения задачи, и предложены необходимые расчетные формулы для обеспечения оптимального теплоснабжения. Получено новое уравнение для идеального температурного графика в зависимости температуры теплоносителя от температуры наружного воздуха. Существуют два наиболее важных параметра: 1) скорость теплообмена между отопительными приборами и помещениями здания; 2) скорость теплообмена между помещениями здания и наружным воздухом. В зависимой системе отопления (и без применения технологии подземного аккумулирования энергии) наилучшими решениями являются следующие: 1) снижение эффективного коэффициента теплоотдачи через наружные стены; 2) строгое соблюдение температурного графика, и он должен быть индивидуальным для каждого здания.

Ключевые слова:

Энергоэффективные здания, оптимизация теплоснабжения, тепловой пункт, система отопления здания, температурный график.

Введение

В современном городе основное потребление энергии сосредоточено в жилых, общественных и коммерческих зданиях, куда энергия преимущественно поставляется по системе центрального энергоснабжения [1]. Поэтому вопрос об экономном расходовании любых видов энергии тесно связан с проектированием таких зданий, где учитываются не только прочность и устойчивость здания к различным внешним воздействиям, но и способы поддержания внутри здания комфортного микроклимата, суточное потребление электрической и тепловой энергии, тщательный подбор строительных материалов.

Новые подходы к проектированию энергоэффективных зданий подразумевают полное обеспечение энергией за счет внутренних источников [2]. Например, для сбалансированного потребления энергии предлагается «зеленая крыша» [3], установить новые нормативные требования к системе

вентиляции и кондиционирования [4], разработать общую энергетическую модель для зданий [5–7], где принимаются в качестве переменных все основные параметры, характеризующие архитектуру, строительные материалы и системы жизнеобеспечения. В энергетической модели здания может учитываться также потребление энергии, ее выработка из возобновляемых источников в разное время суток и время года [8–10].

Наиболее полный обзор исследований по теплоснабжению зданий и экономному расходованию тепловой и электрической энергии содержится в [11]. В настоящей работе основное внимание уделяется системам централизованного теплоснабжения, распространенным во многих северных странах, Средней Азии, а также в северной части Китая. Здесь особенность развития концепции энергетической эффективности зданий заключается в необходимости рассматривать их совместно с системой теплоснабжения.

Теплоснабжение зданий в системе центрального отопления должно удовлетворять следующим требованиям:

- 1) средняя температура $\langle T_r \rangle$ в помещениях должна быть максимально близкой комфортному для человека значению $T_{opt} = \text{const}$;
- 2) общие затраты (например, на работу насосов для прокачки теплоносителя) и потери энергии на участке трубопроводов (E_p , Дж/с) между поставщиком и потребителем теплоты и в самом здании (E_b , Дж/с) должны быть минимальными.

Температура $\langle T_r \rangle$, потери энергии E_p , E_b зависят от многих переменных, которые являются характеристиками трубопроводов, системы автоматического регулирования теплоснабжения здания, системы отопления здания и его теплоизоляции, а также состояния погоды [11, 12]. Но если перечисленные два требования выполнены, то можно констатировать выполнение условия энергетической эффективности. Разумеется, такое понимание энергоэффективности несколько уже, чем принятое для зданий с автономным отоплением [1–5], где есть стремление к проектированию, т. н. «зданий нулевой энергии» [2].

Существуют еще несколько способов определения энергетической эффективности систем транспорта и распределения теплоты [13, 14]. Пусть t_p – срок службы системы. За этот период времени к потребителю поставляется Q Гкал теплоты и затрачивается P_Σ долларов США. Тогда их отношение $W = Q/P_\Sigma$ можно принять за показатель энергетической эффективности системы [13]: чем выше W , тем система эффективнее. Таким образом, общая формулировка оптимизационной задачи имеет вид $W \rightarrow \text{max}$.

Следующая [14] общая постановка оптимизационной задачи включает минимизацию суммы из трех функций – затраты электроэнергии на подачу теплоты потребителю, потери теплоты в системе транспорта и распределения, затраты электроэнергии и потери тепловой энергии при аварии.

Подведем итог к краткому обзору исследований по энергоэффективности зданий и систем энергоснабжения: предложенные ранее подходы [8–10, 13, 14] формулируют задачу в общем виде, на их основе нельзя получить конкретные числовые данные или соотношения. Методы оптимизации тепловой эффективности зданий [6] подразумевают детальное моделирование распределения и переноса тепловой энергии через наружные стены. Это несколько узкая и частная формулировка задачи эффективного теплоснабжения позволяет сформулировать конкретные меры, необходимые для снижения потерь энергии в здании. Более широкая постановка задачи должна включать еще систему регулирования тепловым режимом в здании и линии подачи тепловой энергии в здание, т. е. всю систему теплоснабжения. Настоящая работа посвящена формулировке в явном виде математической задачи оптимизации теплоснабжения в смысле ее энергетической эффективности и поиску ее решений.

Основные уравнения

Как правило, здания имеют большое число секций (помещений), каждая из них имеет свою температуру T_{rn} , где n – номер секций. Для упрощения задачи используем среднее значение температуры $\langle T_r \rangle$ для всех секций.

На практике идеальных теплоизоляционных материалов не существует. Поэтому оптимизационную задачу приходится решать при ограниченных пределах изменения их теплофизических свойств. Точно также ограничены пределы изменения диаметров, гидравлических и теплофизических свойств трубопроводов в системе теплоснабжения.

Если известны потоки теплоты через наружные стенки трубопроводов J_p и здания J_b , то потери через стенки $E_{p,out}$ и $E_{b,out}$ можем записать в виде

$$E_{p,out} = \int_{S_p} J_p ds, \quad E_{b,out} = \int_{S_b} J_b ds.$$

Здесь S_p , S_b – площади поверхности теплоизоляционного материала труб и площадь наружной поверхности здания.

Пусть $E_{p,in} = Q_1 \Delta p_1$ – затраты энергии на прокачку теплоносителя по трубопроводам от поставщика до потребителя с объемным расходом Q_1 и перепадом давления Δp_1 ; $E_{b,in} = Q_2 \Delta p_2$ – затраты энергии в системе регулирования теплоснабжением здания, где регулировка производится с объемным расходом Q_2 и перепадом давления Δp_2 . Тогда в общем виде задачу оптимизации можно записать как

$$E_p = E_{p,in} + E_{p,out} = Q_1 \Delta p_1 + \int_{S_p} J_p ds \rightarrow \min,$$

$$E_b = E_{b,in} + E_{b,out} = Q_2 \Delta p_2 + \int_{S_b} J_b ds \rightarrow \min,$$

$$f = \left(\frac{\langle T_r \rangle - T_{opt}}{T_{outs}} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где T_{outs} – температура наружного воздуха.

Разобьем всю задачу на части, предполагая, что условие $E_p \rightarrow \min$ выполнено. Тогда в дальнейшем задача оптимизации заключается в поиске минимума величины E_b и минимизации отклонения температуры $\langle T_r \rangle$ от комфортного значения T_{opt} .

Наиболее распространенный способ регулирования теплоснабжения здания – это смешение теплоносителя из обратного и подающего трубопровода [11, 15–19]. Новая гидравлическая схема теплового пункта (и здания), включающая также отводящий трубопровод [20], приведена на рисунке.

Здесь приняты обозначения: $T_{in,1}$, $T_{out,1}$ – температура теплоносителя на входе и выходе теплового пункта; $T_{in,2}$, $T_{out,2}$ – температура теплоносителя на входе и выходе системы отопления здания; u – скорость теплоносителя в системе отопления с длиной L и эффективным диаметром трубопроводов D_{eff} ; h – расстояние между секциями; Q_3 – расход через систему отопления.

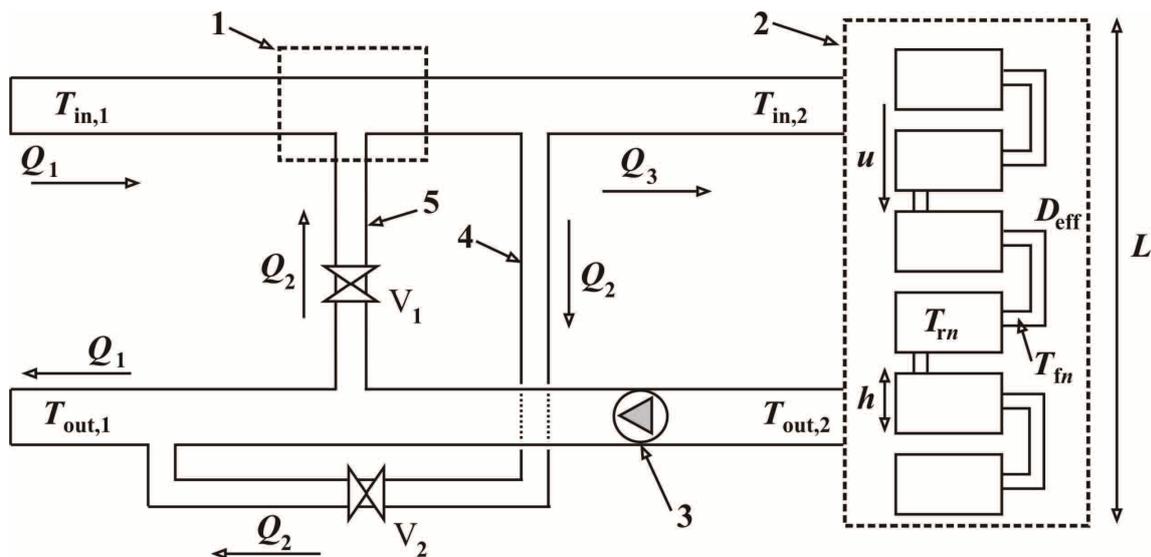


Рисунок. Гидравлическая схема теплового пункта (и здания), 1 – узел смешения; 2 – система отопления здания; 3 – циркуляционный насос; 4 – отводящий трубопровод; 5 – трубопровод для подачи теплоносителя в узел смешения; V_1, V_2 – вентили

Figure. Hydraulic circuit heating unit (and building), 1 – mixing unit; 2 – heating system of a building; 3 – circulation pump; 4 – discharge line; 5 – pipeline for supplying coolant to a mixing unit; V_1, V_2 – valves

Отводящий трубопровод служит для возврата части тепловой энергии в городскую сеть, позволяет не только гибко регулировать потребление тепловой энергии, но и легко избежать возможного перегрева помещений [20].

В независимой системе центрального отопления [11, 15, 16] отводящий трубопровод провести трудно, для этого в системе отопления здания необходимо поддерживать давление выше, чем в городской сети трубопроводов. Это сопряжено с рядом технических трудностей и дополнительными затратами энергии.

Если Q_1 и Q_2 – соответственно объемные расходы теплоносителя в подающем трубопроводе и трубопроводе смесителя, то изменение подачи тепловой энергии в здание достигается вариацией коэффициента смешения $K=Q_2/Q_1$. Тогда на первый план выходит поиск оптимального теплоснабжения, состоящего в выявлении таких значений коэффициента смешения K , которые обеспечивали бы температуру в помещениях, наиболее близкую к фиксированной температуре T_{opt} . Температуры на входе $T_{in,1}$ и снаружи здания T_{outs} могут меняться. Остальные параметры процесса остаются фиксированными.

Пусть здание имеет N этажей (секций). Примем следующие допущения: все этажи имеют одинаковую планировку и равные объемы воздушного пространства (помещения); обогревающие радиаторы системы отопления на всех этажах эквивалентны; помещения и радиаторы на этаже с номером n можно характеризовать соответственно средними по пространству температурами T_{rn} и T_{fn} , причем температура радиаторов и теплоносителя в них одинакова.

Поток теплоты между средами, находящимися при различных температурах, можно представить как произведение разности их температур на коэффициент теплоотдачи [17, 18]. Тогда закон сохранения энергии (без учета внутренних источников энергии, ее радиационного переноса) для теплообмена между помещениями, системой отопления и наружным воздухом на этаже с номером n можно представить в виде [21, 22]

$$\frac{dT_m}{dt} = \alpha(T_{in} - T_m) - \gamma(T_m - T_{outs}),$$

$$\frac{dT_{fn}}{dt} = \frac{u}{h}(T_{i,n-1} - T_{fn}) - \delta\alpha(T_{fn} - T_m), \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1}{c_p \rho V_r}, \quad \gamma = \frac{\alpha_2 S_2}{c_p \rho V_r}, \quad \delta = \frac{c_p \rho V_r}{c_f \rho_f V}.$$

Здесь t – время; c_p, ρ – теплоемкость при постоянном давлении и плотность воздуха; c_f, ρ_f – теплоемкость и плотность теплоносителя; V_r – объем помещений в секции; V – объем теплоносителя в отопительных приборах (в радиаторах); α_1 – коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта воздуха с радиаторами. Эта поверхность имеет площадь S_1 , коэффициент теплоотдачи α_2 между помещениями и наружным воздухом принимается как среднее значение по поверхностям наружных стен и окон помещения, имеющих суммарную площадь S_2 .

Для номера $n=1$ полагаем $T_{i,0}=T_{in,2}$ – температура теплоносителя на входе в систему отопления здания.

Нахождение стационарного распределения температуры теплоносителя T_{fn} и в помещениях здания T_{rn} сводится к решению системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{u}{h}(T_{in,2} - T_{f1}) - \alpha\delta(T_{f1} - T_{r1}) &= 0, \\ \alpha(T_{f1} - T_{r1}) - \gamma(T_{r1} - T_{outs}) &= 0; \\ \frac{u}{h}(T_{f1} - T_{f2}) - \alpha\delta(T_{f2} - T_{r2}) &= 0, \\ \alpha(T_{f2} - T_{r2}) - \gamma(T_{r2} - T_{outs}) &= 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{u}{h}(T_{fn-1} - T_{fn}) - \alpha\delta(T_{fn} - T_{rn}) &= 0, \\ \alpha(T_{fn} - T_{rn}) - \gamma(T_{rn} - T_{outs}) &= 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{u}{h}(T_{fn-1} - T_{fn}) - \alpha\delta(T_{fn} - T_{rn}) &= 0, \\ \alpha(T_{fn} - T_{rn}) - \gamma(T_{rn} - T_{outs}) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) имеют решения

$$\begin{aligned} T_{in} &= T_{outs} + \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}, \\ T_{rn} &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}, \quad n = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (2)$$

На практике параметр $\delta \sim 1$. Случай $\delta = 1$ рассмотрен в работе [21].

Температура $T_{in,2}$ и температура на выходе из системы отопления здания $T_{out,2}$ легко определяются из решения системы двух алгебраических уравнений. Первое из них следует из уравнения сохранения энергии $Q_3 T_{in,2} = Q_2 T_{out,2} + Q_1 T_{in,1}$, записанного для узла смешения и уравнения сохранения массы $Q_3 = Q_1 + Q_2$, и имеет вид

$$T_{in,2} = \frac{T_{in,1} + K T_{out,2}}{1 + K}. \quad (3)$$

Второе уравнение следует из условия равенства температуры теплоносителя на последнем этаже здания температуре $T_{out,2}$. Если здание имеет N этажей, то необходимо привлечь замыкающее соотношение [22]

$$T_{fn} = T_{out,2}. \quad (4)$$

Подставив (3), (4) в первую формулу из (2) при $n=N$, получим

$$(T_{out,2} - T_{outs}) \left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N = \frac{T_{in,1} + K T_{out,2}}{1 + K} - T_{outs}.$$

Отсюда находим $T_{out,2}$:

$$T_{out,2} = \frac{\frac{T_{in,1}}{1 + K} + T_{outs} \left[\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N - 1 \right]}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^N - \frac{K}{1 + K}}. \quad (5)$$

Средняя температура в помещениях

$$\begin{aligned} \langle T_{rn} \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{rn} = \\ &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^n}. \end{aligned}$$

После нахождения суммы геометрической прогрессии получим

$$\begin{aligned} \langle T_{rn} \rangle &= T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{T_{in,2} - T_{outs}}{N} \times \\ &\times \frac{\alpha + \gamma u}{\alpha\gamma\delta h} \left[1 - \left(1 + \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u}\right)^{-N} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражениях (2), (5) и (6) содержится малый параметр

$$\varepsilon = \frac{\alpha\gamma\delta h}{\alpha + \gamma u} \ll 1.$$

По этой причине для относительно небольших зданий ($N \leq 10$) температура в помещениях слабо меняется и практически линейно зависит от номера n . Используя разложения в ряд Тейлора, выражению в квадратных скобках в правой части (6) придадим форму

$$\frac{\varepsilon N(1 + 2\varepsilon)}{1 + \varepsilon N}.$$

Такая форма привлекательна тем, что в двух предельных случаях $\varepsilon \rightarrow 0$ и $N \rightarrow \infty$ сохраняет свойство исходного выражения.

Теперь среднюю температуру в помещениях $\langle T_r \rangle$ на всех этажах можно представить как

$$\langle T_r \rangle \approx T_{outs} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} (T_{in,2} - T_{outs}). \quad (7)$$

Раскладывая в ряд Тейлора правую часть (5) для температуры $T_{out,2}$ получим приближенное выражение

$$\begin{aligned} T_{out,2} &= T_{in,1} \left[1 - \chi(1 + K) \left(1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}}\right) \right], \\ \chi &= \varepsilon N = \frac{\alpha\gamma\delta L}{\alpha + \gamma u}, \quad L = hN, \end{aligned}$$

Тогда из (3) следует

$$T_{in,2} = T_{in,1} \left[1 - \chi K \left(1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}}\right) \right]. \quad (8)$$

Из (7) и (8) находим

$$\begin{aligned} \langle T_r \rangle &\approx T_{outs} + \\ &+ \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \left(T_{in,1} \left[1 - \chi K \left(1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}}\right) \right] - T_{outs} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Условия обеспечения оптимальности теплоснабжения

Условие минимума потери энергии в здании можно записать в виде

$$E_b = Q_1 \Delta p_2 K + \alpha_2 S_2 (\langle T_r \rangle - T_{outs}) \rightarrow \min,$$

где α_2 имеет смысл эффективного коэффициента теплоотдачи. Параметром α_2 учитываются все виды потерь теплоты: конвекцией, излучением и др.

С учетом равенства $K=Q_2/Q_1$ и уравнения (9)

$$E_b = Q_1 \Delta p_2 K + \alpha_2 S_2 \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \times \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \left(T_{in,1} \left[1 - \chi K \left(1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right] - T_{outs} \right) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Перепад давления Δp_2 необходим для обеспечения движения теплоносителя с расходом Q_2 по трубопроводу – 5 на рисунке. Для этого сначала необходимо превысить давление Δp_1 . Поэтому

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 + \zeta \rho_f \frac{Q_2^2}{S^2} = \Delta p_1 + \zeta \rho_f \frac{Q_1^2}{S^2} K^2, \quad (11)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления; S – площадь (внутреннего) сечения трубы – 5.

С учетом (9) условие комфортности примет вид

$$f(K, u) = \frac{1}{T_{outs}^2} (\langle T_r \rangle - T_{opt})^2 = \frac{1}{T_{outs}^2} \times \left[T_{outs} - T_{opt} + \frac{\alpha}{\alpha + \gamma} \frac{1 + 2\varepsilon}{1 + \varepsilon N} \times \left(T_{in,1} \left[1 - \chi K \left(1 - \frac{T_{outs}}{T_{in,1}} \right) \right] - T_{outs} \right) \right] \rightarrow \min. \quad (12)$$

Поиск минимума можно производить по любым входящим в (10)–(12) параметрам. Выбор этих параметров зависит от конкретных условий, накладываемых запросами практики. Уравнения (10)–(12) применимы как для зависимой, так и для независимой системы отопления.

Одно из простейших решений задачи (10)–(12) может быть найдено с требованием $K=0$ [23], оно может выполняться для зависимых систем теплоснабжения [11, 15, 18]. Это равенство означает отсутствие затрат энергии на работу циркуляционного насоса – 3 (рисунок). Тогда из (12) следует

$$T_{in,1} = T_{outs} + \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} \frac{1 + \varepsilon N}{1 + 2\varepsilon} (T_{opt} - T_{outs}). \quad (13)$$

Такая связь между $T_{in,1}$ и T_{outs} называется температурным графиком. Примечательно, что здесь отсутствует зависимость от параметра δ .

Если пренебречь малыми величинами εN и 2ε , то из уравнения (13) следует известное уравнение [23]

$$T_{in,1} = T_{outs} + \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} (T_{opt} - T_{outs}).$$

Случай $K=0$, выполняющийся при отсутствии в тепловом пункте циркуляционного насоса, явля-

ется идеальным для экономии энергии. Если такое равенство достигнуто, то потери энергии в здании происходят только через наружные стены и окна и равны

$$E_b = \alpha_2 S_2 (T_{opt} - T_{outs}). \quad (14)$$

Дальнейшая минимизация E_b может быть обеспечена снижением эффективного коэффициента теплоотдачи α_2 и площади S_2 . Если архитектура здания не позволяет сильно снижать S_2 , то технически возможное неограниченное снижение α_2 означает $\gamma \rightarrow 0$. В этом пределе температурный график становится тривиальным:

$$T_{in,1} = T_{opt}.$$

Уравнения (13), (14) справедливы для любых зданий с произвольным числом секций N . Может только меняться температурный график. Например, предельный (скорее всего гипотетический) случай очень больших зданий $N \gg 1$ (также и $\varepsilon N \gg 1$) приводит к температурному графику

$$T_{in,1} = T_{outs} + \gamma \delta \frac{hN}{u} (T_{opt} - T_{outs}). \quad (15)$$

Для дальнейшего обеспечения энергетической эффективности требуется малое числовое значение комплекса $\gamma \delta h / u$, что может быть достигнуто, например, не только снижением коэффициента теплоотдачи α_2 , но и высокой скоростью теплоносителя u в системе отопления.

При использовании уравнения (15) необходимо принимать во внимание связь $u(K)$, которая может иметь произвольный вид в случае наличия отводящего трубопровода – 4 (рисунок) и рабочего положения вентилей V_1, V_2 . В частности, если расходы в трубопроводах – 4 и 5 равны, то

$$u = \frac{4Q_1}{\pi D_{eff}^2}.$$

Для независимых систем теплоснабжения $K \neq 0$ [11, 15, 18] и задача поиска оптимальных режимов теплоснабжения усложняется.

Заключение

В настоящей работе сформулирована задача оптимизации теплоснабжения здания в системе центрального отопления, где критерием оптимальности является поддержание внутри здания комфортной для человека температуры.

Получены простейшие решения для зависимой системы теплоснабжения. Найдены выражения для температурного графика и величины потерь энергии в случае небольших ($N \sim 1$) и очень больших ($N \rightarrow \infty$) зданий. Для минимизации затрат электрической ($K=0$) и потерь тепловой энергии и обеспечения комфортной температуры в здании необходимо строго придерживаться температурного графика и уменьшать коэффициент теплоотдачи через наружную поверхность здания. В случае небольших зданий оптимальный температурный график отопления не зависит от параметра δ .

Изложенные выше новые теоретические данные об условиях достижения энергетически эффективных систем теплоснабжения указывают на пути решения такой задачи. *Во-первых*, можно создавать более совершенные тепловые пункты [16, 24] с целью достижения равенств $K=0$ и $\langle T_r \rangle = T_{\text{опт}}$, снижения в них потерь тепла из-за увлажнения теплоизоляционного покрытия трубопроводов [25]. *Во-вторых*, можно совершенствовать строительные материалы, конструкционные элементы и архитектуру здания [2, 4–7], что означает снижение α_2 и площади S_2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. – 2008. – V. 40. – Iss. 3. – P. 394–398.
- Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies / A. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – Iss. 4. – P. 971–979.
- Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit / H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison // *Energy and Buildings*. – 2010. – V. 42. – Iss. 10. – P. 1582–1591.
- A review of HVAC systems requirements in building energy regulations / L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, J. F. Coronel, I. R. Maestre // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – Iss. 2–3. – P. 255–268.
- Ryana E.M., Sanquist Th.F. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions // *Energy and Buildings*. – April 2012. – V. 47. – P. 375–382.
- Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. – М.: Изд-во АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
- Малыгина Е.Г. Теплопотери здания: справочное пособие. – М.: Изд-во АВОК-ПРЕСС, 2007. – 265 с.
- Swan L.G., Ugursal V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – V. 13. – Iss. 8. – P. 1819–1835.
- McKenna E., Krawczynski M., Thomson M. Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations // *Energy and Buildings*. – 2015. – V. 96. – Iss. 1. – P. 30–39.
- A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities / U. Wilke, F. Haldi, J.-L. Scartezzini, D. Robinson // *Building and Environment*. – February 2013. – V. 60. – P. 254–264.
- Energy Plus. Engineering Reference. Ed. E. Orlando. 2013. URL: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (дата обращения: 14.09.2014).
- Теплоснабжение и вентиляция / Б.М. Хрусталева, Ю.Я. Кувшинов, В.М. Копко и др. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 784 с.
- Оптимизация затрат при проектировании и эксплуатации тепловых схем и систем теплоснабжения потребителей / В.Р. Ведрученко, В.В. Крайнов, А.П. Стариков, Д.А. Мещеряков, П.В. Петров // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 2. – С. 33–37.
- Колосов М.В., Жуйков А.В. Оптимизация параметров и конфигураций тепловых сетей // *Промышленная энергетика*. – 2013. – № 7. – С. 41–48.
- Стандартные автоматизированные блочные тепловые пункты «Danfoss» / В.В. Невский, Д.А. Дудник, С.В. Семянников и др. – М.: ООО Данфосс, 2011. – 48 с.
- Пырклов В.В. Современные тепловые пункты: Автоматика и регулирование. – Киев: П ДП «Такі справи», 2007. – 250 с.
- Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
- Апарцев М.М. Настройка водяных систем централизованного теплоснабжения: Справочно-методическое пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 204 с.
- Энергосбережение в тепловых пунктах жилых и общественных зданий. Ч. 1. Общая модель теплового пункта / Б.А. Унаспеков, К.О. Сабденов, М.Ж. Кокарев, Б.А. Игембаев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 31–35.
- Тепловой режим в здании при наличии смещения теплоносителя прямого и обратного трубопровода / К.О. Сабденов, Б.А. Унаспеков, М. Ерзада, Б.А. Игембаев // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 1. – С. 71–78.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Ч. 1. Формулировка задачи и основные формулы // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 814–821.
- Энергосбережение в тепловых пунктах жилых и общественных зданий. Ч. 2. Модель обогрева здания / Б.А. Унаспеков, К.О. Сабденов, М.Ж. Кокарев, Б.А. Игембаев // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 35–39.
- Сабденов К.О., Байтасов Т.М., Ерзада М. Оптимальное регулирование теплоснабжением здания. Ч. 2. Анализ и результаты // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 4. – С. 822–828.
- Лисенко О.М., Кужель Л.М., Божко І.К. Управління теплопостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції // *Всхідно-європейський журнал передових технологій*. – 2015. – Т. 1. – № 8 (73). – С. 61–67.
- Половников В.Ю., Губина Е.В. Тепломассоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.
- Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии / А.В. Инкин, И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков, З.Н. Якубовская // *Науковий вісник НГУ*. – 2012. – № 1. – С. 40–45.
- Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V. Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* / Eds. V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, K. Ganushevych. – London: Taylor & Francis Group, 2014. – P. 443–450.

Поступила 16.04.2015 г.

UDC 624.131

OPTIMAL (ENERGY EFFICIENT) HEAT SUPPLY TO BUILDINGS IN CENTRAL HEATING SYSTEM

Kanysh O. Sabdenov,

L.N. Gumilev Eurasian National University, 5, Munaitpasov Street,
Astana, 010008, Kazakhstan. E-mail: sabdenovko@yandex.kz

Talgat M. Baitasov,

L.N. Gumilev Eurasian National University, 5, Munaitpasov Street,
Astana, 010008, Kazakhstan. E-mail: baitasov_tm@enu.kz

The aim of the research is to find the conditions for achieving minimum of energy loss when heating a building in central heating system.

Relevance of research. Rapidly growing world energy consumption has already raised concerns over supply difficulties, exhaustion of energy resources and heavy environmental impacts (ozone layer depletion, global warming, climate change, etc.). The solution of the arising problems requires exact physical and mathematical modeling of energy transport and consumption. The analysis of this model using the methods of optimization theory will allow finding the best solutions of energy supply.

Research methods: analysis and generalization of previously obtained theoretical results and formulation of new approaches.

Results. The paper introduces a brief review of strategies and methods of effective energy supply for public, commercial and residential buildings use. The increasing attention is paid to the central heating system. Providing power effective heat supply is considered as a mathematical minimax problem. The authors have stated the problem of optimizing heat supply of the building connected to the central heating system. The criterion of optimality is maintenance of temperature comfortable for a person in the building and minimum of energy losses. The simplest private solutions of a task are found and necessary settlement formulas for providing an optimality of heat supply are offered. A new equation for the ideal temperature chart – the dependence of the coolant temperature on the outdoor temperature – is obtained. There are two most important parameters: 1) the rate of heat transfer between the heaters and the rooms of the building; 2) the rate of heat exchange between the building and the outside air. In the dependent heating system (without technology of underground energy storage) the best solution are the following: 1) the decrease of the effective coefficient of heat transfer through external walls; 2) strict respect to the temperature chart, and it must be individualized for each building.

Key words:

Energy-efficient buildings, optimization of heat supply, thermal point, system of a building heating, temperature chart.

REFERENCE

- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, Iss. 3, pp. 394–398.
- Marszal A.J., Heiselberg P., Bourrelle J.S., Musall E., Voss K., Sartori I., Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, Iss. 4, pp. 971–979.
- Castleton H. F., Stovin V., Beck S. B. M., Davison J. B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, Iss. 10, pp. 1582–1591.
- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Coronel J.F., Maestre I.R. A review of HVAC systems requirements in building energy regulations. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, Iss. 2–3, pp. 255–268.
- Ryana E.M., Sanquist Th.F. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy and Buildings*, April 2012, vol. 47, pp. 375–382.
- Tabunshikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsia teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS, 2002. 194 p.
- Malyavina E.G. *Teplopoteri zdania. Spravochnoe posobie* [Heat loss of the building. Handbook]. Moscow, AVOK-PRESS, 2007. 265 p.
- Swan L.G., Ugursal V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques (Review). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, Iss. 8, pp. 1819–1835.
- McKenna E., Krawczynski M., Thomson M. Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 96, Iss. 1, pp. 30–39.
- Wilke U., Haldi F., Scartezzini J.-L., Robinson D. A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities. *Building and Environment*, February 2013, vol. 60, pp. 254–264.
- Energy Plus. Engineering Reference*. Ed. E. Orlando. 2013. Available at: <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy> (accessed 14 September 2014).
- Khrustalev B.M., Kuvshinov Yu.Ya., Kopko V.M. *Teplosnabzhenie i ventilyatsia* [Heating and ventilation]. Moscow, Publishing house ACB, 2005. 784 p.
- Vedruchenko V.R., Kraynov V.V., Starikov A.P., Meshcheryakov D.A., Petrov P.V. Optimizatsiya zatrat pri proektirovanii i ekspluatatsii teplovykh sistem i sistem teplosnabzheniya potrebitel'nykh [Optimization of the design and exploitation costs in developing cycle arrangement and heat supply systems]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 2, pp. 33–37.
- Kolosov M.V., Zhuykov A.V. Optimizatsiya parametrov i konfiguratsiy teplovykh setey [Optimization of the parameters and configurations of heat networks]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 7, pp. 41–48.
- Nevsky V.V., Dudnik D.A., Semannikov S.V. *Standartnye avtomatizirovannye teplovye punkty «Danfoss»* [Standard automated thermal points of «Danfoss»]. Moscow, Danfoss Publ., 2011. 48 p.
- Pyrkov V.V. *Sovremennye teplovye punkty: avtomatizatsia i regulirovanie* [Modern thermal points: Automation and regulation]. Kiev, II DP «Taki spravi», 2007. 250 p.
- Singer N.M. *Gidravlicheskie i teplovye regimy teplofikatsionnykh setey* [Hydraulic and thermal regimes of district heating networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 320 p.
- Apartsev M.M. *Naladka vodnykh sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya* [Adjusting water heating systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 204 p.

19. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Kokarev M.Zh., Igembaev B.A. Energoberezhenie v teplovykh punktakh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Ch. 1. Obshchaya model teplovogo punkta [Energy savings in residential and public buildings. P. 1. General model of thermal point]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 31–35.
20. Sabdenov K.O., Unaspekov B.A., Erzada M., Igembaev B.A. Thermal Regime in a Building in the Presence of Mixing of Heat Carriers from Delivery and Return Pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 1, pp. 75–83.
21. Sabdenov K.O., Baytasov T.M., Erzada M. Optimum Control of Heat Supply of a Building. 1. Formulation of the Problem and Basic Formulas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 839–847.
22. Unaspekov B.A., Sabdenov K.O., Kokarev M.Zh., Igembaev B.A. Energoberezhenie v teplovykh punktakh zilykh i obshchestvennykh zdaniy. Ch. 2. Model obogreva zdanya [Energy savings in residential and public buildings. P. 2. Building heating model]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 35–39.
23. Sabdenov K.O., Baytasov T.M., Erzada M. Optimum Control of Heat Supply of a Building. 2. Analysis and Results. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 4, pp. 848–854.
24. Lysenko O., Kuzhel L., Bozhko I. Control of heat supply of building based on the use of individual heat point of original design (in Ukrainian). *Vostochno-evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2015, vol. 1, no. 8 (73), pp. 61–67.
25. Polovnikov V.Yu., Gubina E.V. Heat and Mass Transfer in a Wetted Thermal Insulation of hot Water Pipes Operating Under Flooding Conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, Iss. 5, pp. 1151–1158.
26. Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V., Yakubovskaia Z.N. Modelirovanie teploperenosa v vodosnom gorizonte pri akkumulirovanii i otbore teplovoy energii [Modeling of heat transfer in the aquifer during the accumulation and selection of thermal energy]. *Naukovii visnik NGU*, 2012, no. 1, pp. 40–45.
27. Inkin A.V., Sadovenko I.A., Rudakov D.V. Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. Eds. V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, K. Ganushevych. London, Taylor & Francis Group, 2014. pp. 443–450.

Received: 16 April 2015.

УДК 519.6

РАDME – НОВЫЙ КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ ПЛАНЕТ НА ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Протасов Виктор Александрович,

магистрант факультета Прикладной математики и информатики
Новосибирского государственного технического университета, Россия,
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: pro.vik@bk.ru

Куликов Игорь Михайлович,

канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр. лаборатории Параллельных алгоритмов решения больших задач Института Вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6. E-mail: kulikov@ssd.sccc.ru

Актуальность работы. В последние годы было обнаружено большое количество планет, но возникают сложности с объяснением того, как они образуются. До недавнего времени единственным объектом для наблюдения являлась Солнечная система, и все гипотезы формирования планет основывались именно на этих наблюдениях. Со временем образовалось достаточно четкое понимание того, как происходило формирование Солнечной системы, но, тем не менее, остаются некоторые сомнения, так как неизвестно, что было в начале этого процесса, а что было приобретено позднее. Кроме того, сформировавшиеся представления зачастую не могут объяснить особенностей других планетных систем. Также очень важен вопрос поиска планет земного типа. Даже если какая-то экзопланета будет обладать схожими с Землей характеристиками, нельзя однозначно утверждать, что мы нашли «вторую Землю», так как внутренний, геологический, состав может существенно отличаться. Яркий пример тому – Венера. Другой актуальный вопрос – освоение георесурсов не только соседних планет и астероидов, но в скором времени и более удаленных. Если заранее удастся узнать какими полезными ископаемыми обладает тот или иной космический объект, то можно существенно сократить расходы на анализ грунта с помощью дорогостоящих космических аппаратов. Поэтому важно знать не только кинематические параметры планет, но и их внутренний состав. Таким образом, актуальным становится вопрос о моделировании химикокинетических процессов уже на ранних стадиях эволюции планетной системы. Математическое моделирование наравне с наблюдением может помочь найти ответы на этот вопрос. Но вычислительная астрофизика, как и многие другие области науки, очень требовательна к ресурсам компьютерных систем, если необходимо получить высококачественное решение. Поэтому вопрос разработки новых численных методов и математических моделей также актуален, как и более эффективное использование имеющихся вычислительных мощностей для уже существующих методов.

Цель исследования: разработка нового метода для моделирования процесса планетообразования в 3D2V постановке на основе двухфазного подхода, адаптированного для использования в гетерогенных вычислительных системах, оснащенных графическими ускорителями с поддержкой технологии NVIDIA CUDA.

Методы исследования. Для моделирования газовой компоненты используется метод крупных частиц Белоцерковского–Давыдова, модифицированный с использованием метода Годунова. Пылевая компонента описывается системой N тел, динамика которой просчитывается Particle-Mesh методом. Для повышения точности моделирования динамики частиц используется подход Clouds-in-Cells. Уравнение Пуассона для гравитационного потенциала решается методом быстрого преобразования Фурье.

Результаты. Разработан новый метод для моделирования процесса планетообразования. Представлены результаты тестирования. Газодинамическая часть была проверена на модельных задачах газовой динамики, а оценка правильности решения уравнения Пуассона выполнена на функции с известным распределением потенциала. Также приведен результат моделирования газопылевого диска с образованием уплотнения из газа и пыли, которое можно интерпретировать как протопланету. Показана целесообразность использования графических ускорителей для такого рода задач.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, вычислительная астрофизика, гравитационная газовая динамика, планетообразование, внутреннее строение планет, параллельные численные методы, гетерогенные вычислительные системы, GPGPU, CUDA.

Введение

Поиск планетных систем – одна из важнейших задач современной астрономии. Более десятилетия назад единственным объектом для изучения была Солнечная система. Факт существования других планетных систем был недоказуем, ввиду отсутствия достаточных для этого возможностей. Но в начале 90-х гг., с появлением достаточно мощных телескопов, были обнаружены первые внегалактические планеты, число которых к концу 2014 г. стало порядка 1800.

Современные представления о возникновении Солнечной системы основаны на гипотезе Канта–Лапласа, в соответствии с которой Солнце формировалось одновременно с планетами, которые образовались из околозвездного газа и пыли. Горячие компоненты во внутренней части диска образовали планеты земной группы, а сгустки вещества в холодной внешней части диска образовали ядра планет-гигантов, которые притягивали к себе частицы пыли и остывшего газа, образовавших в дальнейшем оболочку планет. Эта теория доста-

точно точно описывает структуру Солнечной системы, но дает сбой на некоторых других системах. Например, были обнаружены горячие планеты-гиганты, вращающиеся слишком близко к звезде. Также остается открытым вопрос о времени, необходимом для формирования планетной системы. Предполагалось, что этот процесс занимает сотни миллионов лет, но на деле это значение оказалось в десятки раз меньше.

Другая не менее важная проблема – формирование планет в двухзвездных системах. Приблизительно 20 % обнаруженных планет находятся именно в таких системах, но до сих пор нет однозначного объяснения их появления. Наблюдательные возможности позволяют обнаружить планеты в системах со звездами массой $M \approx M_{\odot}$. Звезды с меньшей массой слишком тусклые, чтобы можно было изучить их в деталях, а звезды с большей массой настолько яркие, что даже ближайшие планеты не создают какого-либо значительного затенения. Кроме того, высокие скорости вращения таких звезд исключают возможность использования спектральных методов поиска. Все это делает поиск планетных систем очень трудоемким. Изучение обнаруженных планетных систем позволило описать несколько сценариев их образования. Например, в системе из двух звезд, одна из которых красный гигант, а другая белый карлик, может происходить сброс вещества первой звездой, часть которого затем притягивается к белому карлику, образуя протопланетный диск. Кроме этого, планетные системы могут образоваться в ходе эволюции контактных двойных звезд. Более подробно эти и некоторые другие теории рассмотрены в [1].

Все большую популярность набирают исследования геофизических свойств экзопланет, так как ответ на этот вопрос может помочь не только в поиске планет, схожих с Землей, но и позволит лучше понять процессы, происходящие в недрах планет. Конечно, наилучшим методом исследования является эксперимент, но даже для самых простых случаев – водородных планет – невозможно воссоздать тот диапазон давлений и температур, которые наблюдаются в реальных ситуациях. По наблюдениям также довольно сложно дать ответ на поставленный вопрос, так как даже определение массы и радиуса планет не всегда удается выполнить с достаточной точностью. Но если это все же удалось сделать, можно с некоторой долей вероятности определить некоторые параметры ядра и мантии экзопланеты [2]. Несмотря на то, что физика поведения вещества в недрах планет очень сложна, моделирование этого процесса остается возможным.

Запасы ресурсов нашей планеты сильно ограничены, а за последние годы объемы потребления и добычи основных источников энергии только возрастают [3]. Поэтому вопрос разработки внеземных месторождений не менее актуален, чем развитие альтернативных источников энергии, хоть и рассчитан на более удаленное будущее. Знание то-

го, какими свойствами обладают космические объекты – планеты, их спутники, астероиды и т. д., содержащие в себе интересующие нас минералы, – позволит исключить заведомо бесперспективные исследования грунта с использованием дорогостоящей аппаратуры, которую к тому же вряд ли удастся использовать повторно.

На сегодняшний день выделяют два основных подхода к моделированию протопланетного диска – двухкомпонентный подход [4] и двухфазный [5, 6]. Их отличие состоит в том, как моделируется пылевая компонента диска. В первом подходе частицы пыли представляются несжимаемой сплошной средой (жидкими частицами). Это позволяет учитывать обмен энергией и импульсом между газом и частицами. Во втором подходе частицы моделируются набором дискретных тел, которые оказывают влияние на гравитационное поле диска, но при этом не учитывается их взаимодействие с газом.

В данной работе представлен двухфазный подход. Для моделирования газовой компоненты диска применяется метод крупных частиц Белоцерковского–Давыдова [7], который является развитием метода частиц в ячейках [8], модифицированный с использованием схемы Годунова [9]. Частицы пыли представлены системой N-тел, для решения которой используется Particle-Mesh метод [10, 11]. Для вычисления гравитационного взаимодействия частиц и газа решается уравнение Пуассона для гравитационного потенциала с использованием FFT.

Постановка задачи

Рассмотрим модель динамики протопланетного диска в декартовых координатах, которая описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(v \rho v) = -\text{grad}(p) - \rho \text{grad}(\Phi), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon v) = -(\gamma - 1) \rho \varepsilon \text{div}(v), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E v) = -\text{div}(p v) - (\rho \text{grad}(\Phi), v), \quad (4)$$

$$\text{div}(\text{grad}(\Phi)) = 4\pi G \tilde{\rho}, \quad (5)$$

$$p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\rho E = \rho \varepsilon + \frac{\rho v^2}{2}, \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \tilde{x}}{dt^2} = \frac{F}{\tilde{m}}, \quad (8)$$

$$F = -\text{grad}(\Phi). \quad (9)$$

Уравнения (1)–(7) описывают динамику самогравитирующего газа, а уравнения (8), (9) – динамику произвольной частицы. Здесь ρ – плотность газа; v – скорость движения газа; p – давление газа; ε – внутренняя энергия газа; E – полная энергия газа; γ – показатель адиабаты; Φ – гравитационный потенциал; G – гравитационная постоянная; $\bar{\rho}$ – плотность распределения газа и частиц в трехмерной области; \tilde{x} – позиция некоторой частицы; \tilde{m} – ее масса.

Процесс планетообразования является существенно трехмерным. Но, с течением времени, изначально сферический объект под действием сил притяжения сжимается в центральной части и растягивается под действием центробежной силы. Поэтому, начиная с некоторого момента времени, он может быть рассмотрен в двумерном приближении. Но есть один нюанс. В трехмерном случае решение уравнения Пуассона для гравитационного потенциала пропорционально $\frac{1}{r}$, тогда как для

двумерного случая – $\ln\left(\frac{1}{r}\right)$. Учитывая, что процесс все же является трехмерным, будем рассматривать уравнение Пуассона в трехмерной постановке для получения более физического решения, а динамику газа и движения частиц – в двумерной.

Исходная задача неустойчива, а ее постановка некорректна по Адамару, поэтому необходим дополнительный механизм для контроля правильности получаемого решения [12]. Для этого будем проверять выполнение законов сохранения массы, импульса и энергии.

Моделирование газовой динамики

Моделирование газовой компоненты осуществляется с использованием метода крупных частиц Белоцерковского–Давыдова. Он является развитием метода Харлоу, который используется, например, в [13]. В его основе лежит схема расщепления по физическим процессам – решение исходной системы разбивается на два этапа:

1. Эйлера этап, на котором решается система уравнений газовой динамики без адвективных членов, т. е. происходит пересчет параметров в предположении, что газ является неподвижным, с постоянной плотностью.

2. Лагранжев этап, на котором происходит адвективный перенос газодинамических величин.

В расчетной области вводится прямоугольная сетка с координатами узлов

$$x_i = x_0 + ih_x, \quad i = \overline{0, N_x}, \quad y_j = y_0 + jh_y, \quad j = \overline{0, N_y}.$$

Все газодинамические параметры задаются в центрах ячеек:

$$f_{i,j}^n = f\left(x_{i+\frac{1}{2}}, y_{j+\frac{1}{2}}, t_n\right).$$

Для конечно-разностной аппроксимации уравнений эйлера этапа используется схема Годунова, которая для уравнений вида

$$\frac{\partial U(x)}{\partial t} + \frac{\partial F(x, U)}{\partial x} = 0$$

записывается как

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x} = 0,$$

где $F_{i\pm\frac{1}{2}}$ – значение на границе ячейки справа и слева. Для определения этих значений рассмотрим следующую систему уравнений газовой динамики для идеального газа на эйлеровом этапе:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(\gamma - 1)p \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Эта система имеет аналитическое решение:

$$v^* = \frac{v_L + v_R}{2} + \frac{p_L - p_R}{2} \sqrt{\frac{\rho_L + \rho_R}{\rho_L \rho_R (\gamma - 1)(p_L + p_R)}},$$

$$p^* = \frac{p_L + p_R}{2} + \frac{v_L - v_R}{2} \sqrt{\frac{\rho_L \rho_R (\gamma - 1)(p_L + p_R)}{\rho_L + \rho_R}},$$

где (v_L, p_L, ρ_L) – значения газодинамических параметров в левой ячейке, а (v_R, p_R, ρ_R) – в правой. Таким образом, конечно-разностная схема решения системы уравнений на эйлеровом этапе имеет вид:

$$\frac{\rho_{i,j}^{n+1} - \rho_{i,j}^n}{\Delta t} = 0,$$

$$\frac{\rho v_{x_{i,j}}^n - \rho v_{x_{i,j}}^{n-1}}{\Delta t} =$$

$$= -\frac{P_{i+1,j}^* - P_{i-1,j}^*}{h_x} - \rho_{i,j}^{n-1} \frac{\Phi_{i+1,j}^n - \Phi_{i-1,j}^n}{2h_x}, \quad (10)$$

$$\frac{\rho v_{y_{i,j}}^n - \rho v_{y_{i,j}}^{n-1}}{\Delta t} =$$

$$= -\frac{P_{i,j+1}^* - P_{i,j-1}^*}{h_y} - \rho_{i,j}^{n-1} \frac{\Phi_{i,j+1}^n - \Phi_{i,j-1}^n}{2h_y}, \quad (11)$$

$$\frac{P_{i,j}^n - P_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} =$$

$$= -(\gamma - 1) P_{i,j}^{n-1} \left(\frac{v_{x_{i+1,j}}^* - v_{x_{i-1,j}}^*}{h_x} + \frac{v_{y_{i,j+1}}^* - v_{y_{i,j-1}}^*}{h_y} \right). \quad (12)$$

Уравнения (10) и (11) получены из уравнения (2) и позволяют вычислить x - и y -компоненту импульса, соответственно. Уравнение для давления (12) получено из (3), если в него подставить (6).

Для определения схемы расчета на лагранжевом этапе рассмотрим произвольную ячейку (рис. 1). В этой ячейке в общем случае есть как исходящий поток газа, так и входящий. Будем рассматривать потоки только через ребра ячейки.

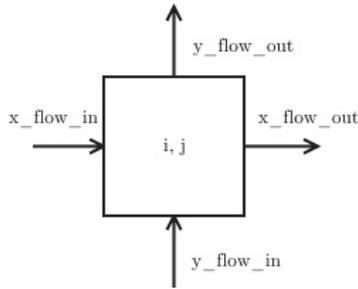


Рис. 1. Поток газа через ячейку

Fig. 1. Gas flow through a cell

Количество вещества, которое останется в ячейке через время τ , можно рассчитать по следующей формуле:

$$M_{i,j}^{n+1} = M_{i,j}^n + \frac{\tau}{h_x}(x_flow_in_{i,j} - x_flow_out_{i,j}) + \frac{\tau}{h_y}(y_flow_in_{i,j} - y_flow_out_{i,j}).$$

Для определения потоков через границы используется модификация классического способа расчета, которая учитывает возможный «скос» границы (рис. 2) за счет различных скоростей в узлах.

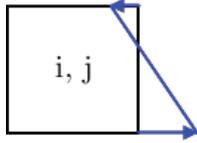


Рис. 2. Скос границы ячейки

Fig. 2. Downwash of a cell boundary

Выходящий поток по оси x тогда рассчитывается как

$$x_flow_out_{i,j} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^1 v_x^{i+\frac{1}{2},j+(k-\frac{1}{2})} \begin{cases} M_{i,j}, v_x^{i+\frac{1}{2},j+(k-\frac{1}{2})} > 0 \\ M_{i+1,j}, v_x^{i+\frac{1}{2},j+(k-\frac{1}{2})} \leq 0 \end{cases}$$

Метод крупных частиц Белоцерковского–Давыдова, как и многие другие методы, использующие явные конечно-разностные схемы, является условно устойчивым. Условие устойчивости заключается в том, чтобы $CFL < 1$. Где CFL – число Куранта–Фредриксона–Леви, которое определяется как

$$CFL = \frac{\tau(c_s + \max(|v_x|, |v_y|))}{\min(h_x, h_y)},$$

где $c_s = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$ – скорость звука в веществе.

Моделирование пылевой компоненты

При моделировании динамики частиц основная трудность состоит в определении силы, действующей на некоторую частицу со стороны других частиц. Кроме этого, необходимо учитывать взаимодействие гравитационных полей газа и частиц.

В данной работе используется метод Particle-Mesh, который позволяет сократить вычислительные затраты на этом этапе моделирования. Суть метода заключается в том, что мы разбиваем расчетную область на конечное множество ячеек и в каждой из них рассчитываем плотность частиц. Затем для полученного распределения плотности решается уравнение Пуассона для гравитационного потенциала. Зная потенциал можно без особого труда посчитать силу притяжения как $F = -grad(\Phi)$, где Φ вычисляется из уравнения (5) с учетом того, что $\tilde{\rho} = \rho_{gas} + \rho_{particles}$.

У данного метода существует весомый недостаток – точность. При использовании классического подхода (когда сила, действующая на частицу, вычисляется как $F_i = \sum_{i \neq j} G \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2}$) точность расчета силы притяжения зависит только от точности суммирования. В этом же методе существует несколько источников погрешности:

- вычисление плотности частицы в ячейке. Как и в методе Харлоу, здесь не избежать колебаний плотности при переходе частицы из ячейки в ячейку, что приводит к нефизичным флуктуациям решения;
- вычисление гравитационной силы. Гравитационный потенциал привязывается не к частице, а к центру ячейки.

Чтобы уменьшить влияние этих факторов плотности частицы в ячейке и сила, действующая на нее, вычисляются по методу Clouds-In-Cells (CIC) [14]. При таком подходе считается, что координаты частицы – координаты центра массы «облака» конечного размера. Плотность такого облака распределяется между ячейками, в которые оно попало (рис. 3).

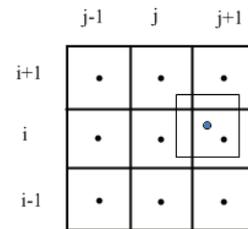


Рис. 3. Плотность частицы распределяется между ячейками (i,j), (i+1,j), (i,j+1), (i+1,j+1)

Fig. 3. Particle density is distributed among the cells (i,j), (i+1,j), (i,j+1), (i+1,j+1)

Таким образом, плотность частиц в некоторой ячейке и сила, действующая на частицу, вычисляются как:

$$\rho_{i,j} = \sum_{c \in clouds} W_{i,j}(x,y) \rho_c(x,y),$$

$$F_c = - \sum_{i,j} W_{i,j}(x,y) grad(\Phi)_{i,j},$$

где

$$W_{i,j}(x,y) = \begin{cases} \left(\left(1 - \frac{|x-x_i|}{h_x} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{|y-y_j|}{h_y} \right) \right) & |x-x_i| \leq h_x \ \& \ |y-y_j| \leq h_y \\ 0, & \text{èí à ÷} \end{cases}$$

Данный подход, конечно же, не решает проблемы полностью, но он позволяет существенно сократить ошибку вычислений, что подробно рассмотрено в [14].

Решение уравнения Пуассона

Для определения гравитационного потенциала в расчетной области необходимо решить уравнение Пуассона, которое с учетом обезразмеривания выглядит как

$$\Delta \Phi = 4\pi\tilde{\rho}$$

Для этого зададим трехмерную декартову сетку, центральный слой которой совпадает с сеткой для моделирования динамики газа и частиц, и будем аппроксимировать оператор Лапласа 27-точечным разностным шаблоном. Представим потенциал и плотность в виде суперпозиции по собственным функциям оператора, в результате чего получим следующую схему решения уравнения в пространстве гармоник:

$$\Phi_{j,m,n} = - \frac{4\pi\rho_{j,m,n}}{\left(1 - \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi j}{N_x} \right) \right) \times \right. \\ \left. 6 \times \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi m}{N_y} \right) \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi n}{N_z} \right) \right) \right)} \tag{13}$$

Таким образом, решение уравнение Пуассона можно разбить на три этапа:

1. Перевод в пространство гармоник $4\pi\rho_{i,j,k}$.
2. Вычисление в нем значений потенциала по формуле 13).
3. Преобразование найденных значений обратно в функциональное пространство

Для перехода в пространство гармоник и обратно используется быстрое преобразование Фурье.

Крайевые условия уравнения Пуассона полностью определяют решение задачи, поэтому их постановка является достаточно важной проблемой. Известно, что на бесконечном удалении от объекта можно считать потенциал нулевым, но обстоятельства складываются таким образом, что у нас нет возможности удовлетворить необходимым условиям. В работе [15] используется способ вычисления значений на границе через моменты инерции:

$$\Phi(r)|_G = - \frac{m}{|r|} - \frac{S_x + S_y + S_z}{|r|^2} - \frac{I_x + I_y + I_z - 3I_0}{2|r|^3},$$

где m – общая масса газа и частиц;

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$$

– расстояние от центра масс до точки с координатами (x,y,z) ; S_x, S_y и S_z – статические моменты инерции; I_x, I_y и I_z – осевые моменты инерции, а I_0 – момент инерции, проведенный через точку (x,y,z) и точку начала координат.

Тестирование

Для верификации программной реализации выполнялось тестирование отдельно газодинамической части с использованием тестов Годунова [16] и на модельных задачах. Отдельно был протестирован метод решения уравнения Пуассона на задачах с аналитическим решением. Выполнено тестовое моделирование динамики частиц.

Приведем некоторые результаты расчетов модельных задач газовой динамики.

1. Неустойчивость Рэля-Тейлора. Рассмотрим область $[-0,5;0,5] \times [-0,5;0,5]$, заполненную газом, находящемся в поле силы тяжести, с плотностью $\rho = \begin{cases} 1, & y \leq 0 \\ 2, & y > 0 \end{cases}$ и давлением $p=2,5-\rho y$. На

границе раздела сред задано возмущение:

$$v_y = A(y)[1 + \cos(6\pi x)], \quad A(y) = \begin{cases} 10^{-2}, & |y| \leq 0,01 \\ 0, & |y| > 0,01 \end{cases}$$

Результат представлен на рис. 5, а.

2. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Неустойчивость возникает, когда контактирующие среды движутся с различными скоростями и на границах раздела имеются возмущения. Зададим в области $[-0,5;0,5] \times [-0,5;0,5]$ газ с плотностью $\rho = \begin{cases} 2, & |y| \leq 0,25 \\ 1, & |y| > 0,25 \end{cases}$, давлением $p=2,5$ и скоростью $v_x = \begin{cases} -0,5, & |y| \leq 0,25 \\ 0,5, & |y| > 0,25 \end{cases}$, $v_y = A(y)[1 + \cos(8\pi x)]$,

$$\text{где } A(y) = \begin{cases} 0,01, & |y-0,25| \leq 0,1 \\ -0,01, & |y+0,25| \leq 0,1 \\ 0, & \text{èí à ÷} \end{cases}$$

Результат представлен на рис. 5, б.

3. Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова. Данный вид неустойчивости возникает на границе раздела двух сред при прохождении через нее ударной волны. Рассмотрим конфигурацию, представленную на рис. 4. В области задано два слоя газа различной плотности и ударная волна. Результат моделирования показан на рис. 6, а. Похожую картину можно наблюдать и в случае, когда область разрежения находится внутри

более плотного слоя газа [17, 18]. Пусть область $[-1;1] \times [-0,5;0,5]$ заполнена покоящимся газом с параметрами $p=\rho=1$. В области $[0,375;0,625] \times [-0,125;0,125]$ находится разреженный газ с плотностью $\rho=1/29$ и давлением $p=1$. При $x>0,75$ задана ударная волна с параметрами $p=3/2$ и $\rho=4/3$. Результат расчета представлен на рис. 6, б.

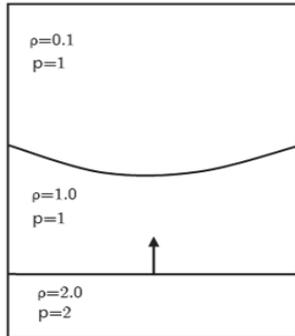


Рис. 4. Начальные параметры газа для неустойчивости Рихтмайера-Мешкова

Fig. 4. Initial parameters of gas for Richtmyer-Meshkov instability

Проверим правильность решения уравнения Пуассона на задаче с известной функцией потенциала на вложенных сетках:

$$\Phi(r) = \begin{cases} \frac{4}{15}\pi r^5 - \frac{3\pi}{5}r^4 + \frac{2\pi}{3}r^2 - \frac{3\pi}{5}, & r \leq 1 \\ -\frac{4\pi}{15r}, & r > 1 \end{cases},$$

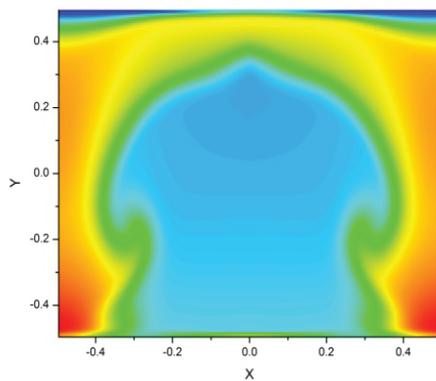
$$\rho(r) = \begin{cases} 2r^3 - 2r^2 + 1, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}.$$

Как видно из таблицы, имеет место 2-й порядок аппроксимации.

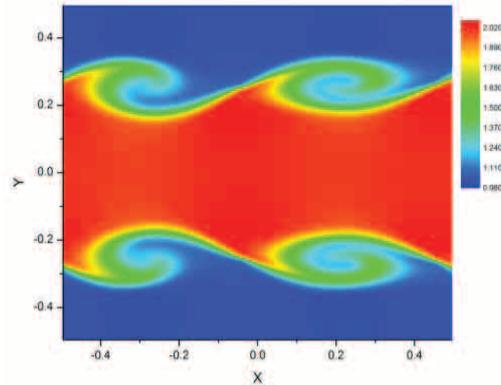
Таблица. Результаты решения уравнения Пуассона

Table. Results of solution of Poisson equation

Размер сетки Grid size	Относительная погрешность Relative norm of error
16 ³	6,425461e-003
32 ³	1,593152e-003
64 ³	4,012327e-004
128 ³	1,040856e-004
256 ³	2,462044e-005



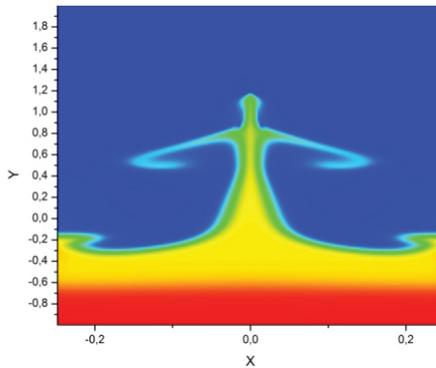
a/a



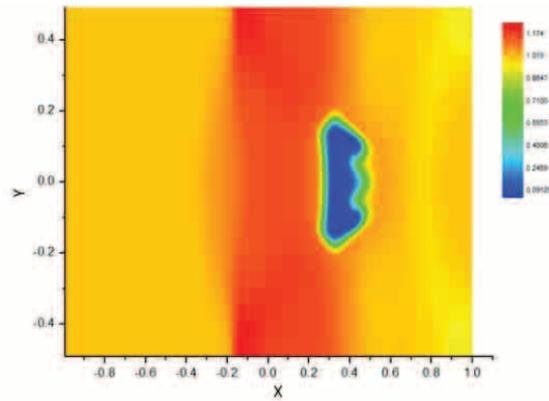
б/б

Рис. 5. Распределение плотности газа для неустойчивости а) Рэлея-Тейлора при $t=6,2$; б) Кельвина-Гельмгольца при $t=3,0$

Fig. 5. Gas density distribution for instability of: a) Rayleigh-Taylor at $t=6,2$; b) Kelvin-Helmholtz at $t=3,0$



a/a



б/б

Рис. 6. Распределение плотности газа для неустойчивости Рихтмайера-Мешкова при: а) $t=3,0$; б) $t=0,7$

Fig. 6. Gas density distribution for Richtmyer-Meshkov instability at: a) $t=3,0$; b) $t=0,7$

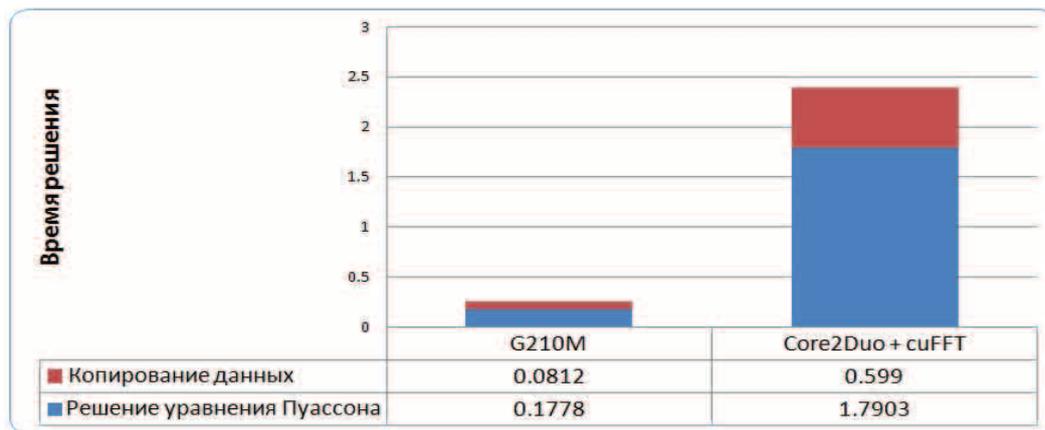


Рис. 7. Ускорение решения уравнения Пуассона

Fig. 7. Acceleration of Poisson equation solution

Параллельная реализация

Распараллеливание выполняется с использованием графических ускорителей с поддержкой технологии NVIDIA CUDA [19, 20], впрочем, использование MIC-архитектур также является возможным [21]. Самым долгим этапом моделирования является решение уравнения Пуассона. Часть работы по распараллеливанию уже проведена за нас – преобразование Фурье реализовано на GPU в библиотеке cuFFT. Ускорить этап можно, если перенести на видеокарту учет краевых условий и вычисление потенциала в пространстве гармоник, что позволит дополнительно сократить количество пересылок данных. В результате удалось добиться почти 10-кратного ускорения на довольно слабой мобильной видеокарте (рис. 7).

Перенос газодинамики на видеокарту, как показала практика, не является целесообразным. Для обеспечения контроля точности решения проверяются законы сохранения энергии, массы и импульса, что требует редукции всех газодинамических параметров. Скорость выполнения редукции на GPU становится сравнимой с однопоточной версией на CPU только для очень больших объемов данных. Если оставить выполнение редукции на процессоре, а другую часть перенести на видеокарту, то значительно возрастает количество операций копирования данных с устройства, что составляет примерно половину времени расчета на одном ядре процессора. Поэтому было решено выполнять газодинамический расчет только на процессоре.

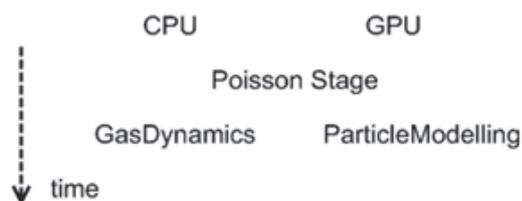


Рис. 8. Схема выполнения этапов моделирования

Fig. 8. Diagram of modeling stage implementation

Моделирование динамики частиц в текущей реализации прекрасно параллелится – было получено 4-кратное ускорение при моделировании динамики 10^6 частиц относительно одного ядра процессора. Кроме того, этот этап может выполняться независимо от этапа моделирования динамики газа, поэтому можно предложить следующую схему выполнения, представленную на рис. 8.

Моделирование динамики газопылевого диска

Рассмотрим область $[-2,5;2,5] \times [-2,5;2,5]$, в которой задан газ с параметрами:

$$\rho(r) = \begin{cases} 2, & r < 2 \\ 3, & r < 0,25 \end{cases}, \quad p(r) = \begin{cases} 1, & r < 2 \\ 2, & r < 0,25 \end{cases}$$

$$\omega(r) = 2(2-r)^2.$$

Также в области $R \in [0,5;2,0]$ равномерно распределено 50 000 частиц с массой $m = 5 \cdot 10^{-5}$ и угловой скоростью $\omega(r) = 2(2-r)^2 + \varepsilon$, где ε – небольшое отклонение.

На рис. 9, а, б видно образование кольца из газа и пыли, в котором формируется уплотнение, состоящее в основном из частиц. Этот сгусток плотности можно интерпретировать как потенциальную планету.

Заключение

В работе представлен новый метод моделирования процесса планетообразования на основе метода крупных частиц и РМ-метода, ориентированный на использование в гибридных вычислительных системах. Продемонстрирована работоспособность алгоритма на модельных задачах. Проведен расчет динамики газопылевого диска.

Представленный метод не является финальной точкой. Это лишь робкий шаг на пути к высококачественным алгоритмам в области вычислительной астрофизики, позволяющим с высокой точностью дать ответ на важнейшие вопросы, связанные с изучением вселенной. Из возможных улучшений можно выделить добавление процесса коагуляции ча-

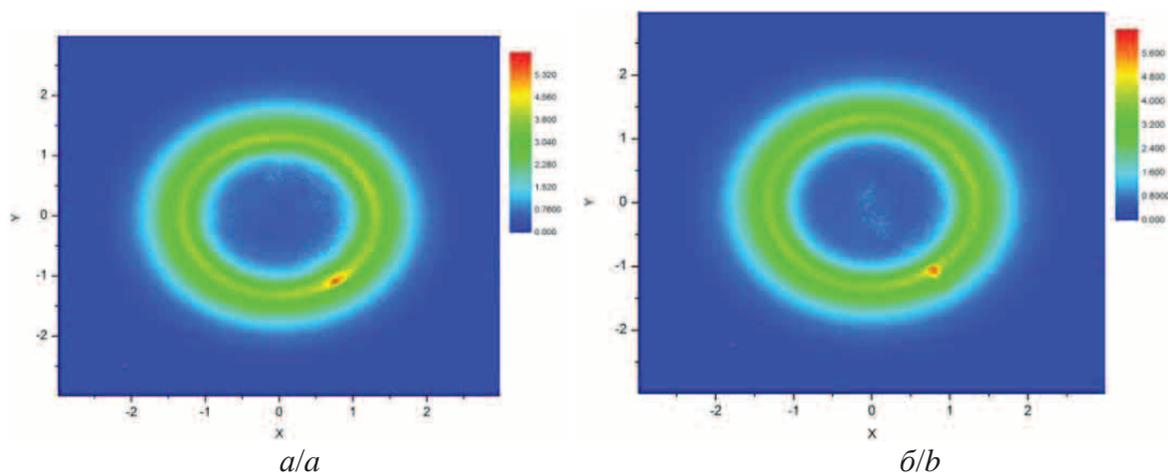


Рис. 9. Моделирование газопылевого диска: а) $t=0,39$; б) $t=0,4$

Fig. 9. Modeling of gas-and-dust disc: a) $t=0,39$; б) $t=0,4$

стиц, уменьшение влияния вычислительных эффектов при моделировании газовой динамики, использование менее требовательного ко времени метода решения уравнения Пуассона. Также актуальным остается использование суперкомпьютеров – рассмотренный метод имеет очень неплохие харак-

теристики в плане масштабируемости, как показано в [22].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15–01–00508 и № 15–31–20150 мол. а. вед., а также поддержана грантом Президента РФ МК-6648.2015.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tutukov A.V., Fedorova A.V. Formation of Planets during the Evolution of Single and Binary Stars // *Astronomy Reports*. – 2012. – V. 54. – № 4. – P. 305–314.
2. Can we Constrain Interior Structure of Rocky Exoplanets from Mass and Radius Measurements? / C. Dorn et al. // *A&A*. – 2015. – V. 577. – P. 12–31.
3. BP Statistical Review of World Energy. June 2015. 64th ed. URL: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> (дата обращения: 03.03.2015)
4. A Two-Phase Code for Protoplanetary Disks / S. Inaba et al. // *A&A*. – 2005. – V. 431. – P. 365–379.
5. SEREN – a New SPH Code for Star and Planet Formation Simulations. Algorithms and Tests / D.A. Hubber et al. // *A&A*. – 2011. – V. 529. URL: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2011/05/aa14949-10.pdf> (дата обращения: 03.03.2015)
6. Численное решение трехмерных задач динамики самогравитирующих многофазных систем / В.А. Вшивков и др. // *Научный вестник НГТУ*. – 2011. – № 3 (44). – С. 69–80.
7. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
8. Harlow F.H. The Particle-in-Cell Method for Numerical Solution of Problems in Fluid Dynamics // *Proceedings of Symposium in Applied Mathematics*. – New York, 1963. – V. 15. – № 10. – P. 269–288.
9. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. – М.: Физматлит, 2001. – 608 с.
10. Hockney R.W., Eastwood J.W. *Computer Simulation Using Particles*. – New York: Adam Hilger, IOP Publication Ltd., 1989. – 540 с.
11. Moscardini L. Cosmological Particle-Mesh N-Body Simulations and the Role of Initial Conditions // *Rend. Sem. Mat. Univ. Pol. Torino*. – 1993. – V. 51. – № 3. – P. 249–266.
12. Computational Methods for Ill-Posed Problems of Gravitational Gasodynamics / Vshivkov V.A. et al. // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 2011. – V. 19. – № 1. – P. 151–166.
13. Боронина М.А., Вшивков В.А., Дудникова Г.И. Неявная схема для решения уравнений Максвелла в областях с различными масштабами // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 4. – С. 39–46.
14. Birdsall C.K., Fuss D. Clouds-in-Clouds, Clouds-in-Cells Physics for Many-Body Plasma Simulation // *Journal of Computational Physics*. – 1997. – V. 135. – P. 141–148.
15. Параллельная реализация на суперЭВМ модели газовой компоненты самогравитирующего протопланетного диска / Вшивков В.А. и др. // *Вычислительные технологии*. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 38–52.
16. Toro E.F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. – Berlin: Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1999. – 640 p.
17. Рыбакин Б.П., Шидер Н.И. Построение параллельных алгоритмов для решения задач гравитационной газовой динамики // *Вычислительные методы и программирование*. – 2010. – Т. 11. – С. 388–394.
18. Рыбакин Б.П. Численное моделирование задач газовой динамики на многопроцессорных ЭВМ // *Параллельные вычисления и задачи управления: Доклады пятой Междунар. конф.* – Москва, 2010. – С. 161–170.
19. Боресков А.В., Харламов А.А. *Основы работы с технологией CUDA*. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 232 с.
20. Сандерс Дж., Кэндрот Э. *Технология CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров*. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 232 с.
21. Куликов И.М., Черных И.Г., Глинский Б.М. AstroPhi: программный комплекс для моделирования динамики астрофизических объектов на гибридных суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. – 2013. – Т. 2. – № 4. – С. 57–79.
22. Параллельная реализация численной модели столкновения галактик / И.М. Куликов и др. // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*. – 2011. – Т. 9. – № 4. – С. 71–78.

Поступила 11.03.2015 г.

UDC 519.6

PADME – A NEW CODE FOR MODELING PLANET GEORESOURCES FORMATION ON HETEROGENEOUS COMPUTING SYSTEMS

Viktor A. Protasov,

Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: pro.vik@bk.ru

Igor M. Kulikov,

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kulikov@ssd.sccc.ru

Relevance of the research. Many planets were detected in last few years, but there is no clear understanding of how they are formed. The Solar system was the only object for observation until recently, and all hypotheses about planet formation were based only on it. The fairly clear understanding about Solar system formation was founded with time, but there are some doubts yet, because we do not know what was in the beginning of the process, and what was acquired afterwards. Moreover, the formed ideas often could not explain some features of other systems. Searching for Earth-like terrestrial planets is another very important problem. Even if any of found exoplanets will be similar to Earth, we could not say that it is the «second Earth» exactly, because its internal, geological, composition could be different. Venus is a vivid example of this. Another relevant issue is exploring geo assets not only of nearby planets and asteroids, but in the near future of more distant space objects. If we know what minerals are inside them, we will cut the costs on the ground analysis with expensive spacecrafts. Therefore, it is very important to know not only the kinematic characteristics of a planet, but its internal composition as well. Thus, the issue of chemical-kinetics modeling in the early stages of the planetary system evolution becomes urgent. Mathematical modeling on a par with observation could help to find the answers to this question. But the computational astrophysics, as many other fields of science, is very demanding to resources of computing systems, if we want to obtain the high quality solution. So developing new numerical methods and mathematical models are as relevant as more efficient use of computational power in existing methods.

The aim of the study is to develop a new method for modeling planet formation in 3D2V formulation based on two-phase approach, adapted for using in heterogeneous computing systems equipped with graphics accelerators supporting NVIDIA CUDA technology.

The methods of the study. Fluids-in-cells method of Belotserkovskii–Davydov, modified with using the Godunov method, is used to model the gas component. A dust component is described by N-body system solved with Particle-Mesh method. The Clouds-in-Cells approach is used to increase the accuracy of modeling of the particles dynamics. Poisson equation for gravitational potential is solved with fast Fourier transform method.

The results. The authors have developed the method for modeling planet formation. The verification results are introduced. The gas dynamics part was tested with use of model problems in gas dynamics, and correctness of solution of Poisson equation was assessed by using function with known potential distribution. The paper introduces as well the gas-dust disk modeling results with formation of sealing of gas and dust, which can be interpreted as potential exoplanet. Advisability of using the graphics accelerators for such problems is demonstrated.

Key words:

Mathematical modeling, computational astrophysics, gravitational gas dynamics, planet formation, planetary interior, parallel numerical methods, heterogeneous computing systems, GPGPU, CUDA

The research was financially supported by RFBR within the scientific projects no. 15–01–00508 and 15–31–20150 мол_a_вед, as well as by the grant of the President of the RF MK-6648.2015.9.

REFERENCES

1. Tutukov A.V., Fedorova A.V. Formation of Planets during the Evolution of Single and Binary Stars. *Astronomy Reports*, 2012, vol. 54, no. 4, pp. 305–314.
2. Dorn C. Can we Constrain Interior Structure of Rocky Exoplanets from Mass and Radius Measurements? *A&A*, 2015, vol. 577, pp. 12–31.
3. *BP Statistical Review of World Energy*. June 2015. 64th ed. Available at: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> (accessed 03 March 2015).
4. Inaba S. A Two-Phase Code for Protoplanetary Disks. *A&A*, 2005, vol. 431, pp. 365–379.
5. Hubber D.A. SEREN – a New SPH Code for Star and Planet Formation Simulations. Algorithms and Tests. *A&A*, 2011, vol. 529. Available at: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2011/05/aa14949-10.pdf> (accessed 03 March 2015).
6. Vshivkov V.A. Chislennoe reshenie trekhmernykh zadach dinamiki samogravitiiruyushchikh mnogofaznykh sistem [Numerical solution of three-dimensional problems of the dynamics of self-gravitating multiphase systems]. *Scientific Bulletin of NSTU*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 69–80.
7. Belotserkovskii O.M., Davydov Iu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* [Method of large particles in gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 392 p.
8. Harlow F.H. The Particle-in-Cell Method for Numerical Solution of Problems in Fluid Dynamics. *Proc. of Symposium in Applied Mathematics*. New York, 1963. Vol. 15, no. 10, pp. 269–288.
9. Kulikovskii A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. *Matematicheskie voprosy chislennogo resheniya giperbolicheskikh sistem uravneniy* [Mathematical problems of numerical solutions of hyperbolic systems of equations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 608 p.
10. Hockney R.W., Eastwood J.W. *Computer Simulation Using Particles*. New York, Adam Hilger, IOP Publication Ltd., 1989. 540 p.
11. Moscardini L. Cosmological Particle-Mesh N-Body Simulations and the Role of Initial Conditions. *Rend. Sem. Mat. Univ. Pol. Torino*, 1993, vol. 51, no. 3, pp. 249–266.

12. Vshivkov V.A. Computational Methods for Ill-Posed Problems of Gravitational Gasodynamics. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 2011, vol. 19, no 1, pp. 151–166.
13. Boronina M.A., Vshivkov V.A., Dudnikova G.I. Neyavnaya skhema dlya resheniya uravneniy Maksvela v oblastiakh s razlichnyimi masshtabami [An implicit scheme for solving Maxwell's equations in domains with different scales]. *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*. 2014, no. 4, pp. 39–46.
14. Birdsall C.K., Fuss D. Clouds-in-Clouds, Clouds-in-Cells Physics for Many-Body Plasma Simulation. *Journal of Computational Physics*, 1997, vol. 135, pp. 141–148.
15. Vshivkov V.A. Parallelnaya realizatsiya na superEVM modeli gazovoy komponenty samogravitiruyushchego protoplanetnogo diska [Parallel implementation of the model of gas component of self-gravitating protoplanetary disk on supercomputer]. *Computational technologies*. 2007, vol. 12, no. 3, pp. 38–52.
16. Toro E.F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Berlin, Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 1999. 640 p.
17. Rybakin B.P., Shider N.I. Postroenie paralelnykh algoritmov dlya resheniya zadach gravitatsionnoy gazovoy dinamiki [Development of parallel algorithms for solving the problems of gravitational gas dynamics]. *Numerical methods and programming*, 2010, vol. 11, pp. 388–394.
18. Rybakin B.P. Chislennoe modelirovanie zadach gazovoy dinamiki na mnogoprotsessornykh EVM [Numerical modelling of gas dynamics problems on multiprocessing computers]. *Parallelnye vychisleniya i zadachi upravleniya. Doklady pyatoy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the fifth Intern. conf. Parallel computing and control problems]. Moscow, 2010. pp. 161–170.
19. Borekov A.V., Kharlamov A.A. *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA* [Basics of CUDA technology]. Moscow, DMK Press, 2010. 232 p.
20. Sanders J., Kandrot E. *CUDA by Example. An introduction to general-purpose GPU programming*. Moscow, DMK Press, 2011. 232 p.
21. Kulikov I.M., Chernykh I.G., Glinskiy B.M. AstroPhi: programmy kompleks dlya modelirovaniya dinamiki astrofizicheskikh obektov na gibridnykh superEVM, osnashchennykh uskoritelnyami Intel Xeon Phi [AstroPhi: a hydrodynamical code for complex modelling of astrophysical objects dynamics by means of hybrid architecture supercomputers on Intel Xeon Phi base]. *Bulletin of the South Ural state university. Series «Computational mathematics and software engineering»*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 57–79.
22. Kulikov I.M. Parallelnaya realizatsiya chislennoy modeli stolknoveniya galaktik [Parallel program for numerical model of colliding galaxies]. *Scientific Bulletin of NSTU*, 2011, vol. 9, no. 4, pp. 71–78.

Received: 11 March 2015.

УДК 543.554.4

КОМПЛЕКСОМЕТРИЧЕСКОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕДИ (II) И ЦИНКА (II) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Шумар Светлана Викторовна,

канд. хим. наук, доцент каф. аналитической химии Химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: shumar.svetlana@yandex.ru

Гавриленко Михаил Алексеевич,

канд. хим. наук, доцент каф. технологии органических веществ и полимерных материалов Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: dce@tpu.ru

Кузьминская Елена Анатольевна,

магистрант каф. аналитической химии Химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: elanky@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования метода потенциометрического анализа многокомпонентных смесей.

Цель исследования заключается в разработке способа комплексонометрического дифференцированного определения ионов меди (II) и цинка (II) из одного раствора методом потенциометрического титрования с компьютерной обработкой результатов титрования по способу фрагментарной линеаризации.

Методы исследования: титриметрия с визуальной индикацией точки эквивалентности, потенциометрия, метод фрагментарной линеаризации кривых титрования. Для отдельного определения металлов, дающих комплексоны близкой прочности, предложен метод потенциометрического титрования с варьированием кислотности среды в процессе титрования. Обработку данных потенциометрического титрования проводили методом линеаризации. Метод основан на построении математической модели процесса логарифмической кривой титрования, которую преобразуют заменой переменных в линейную регрессионную характеристику.

Результаты работы. Изучены условия дифференцированного комплексонометрического титрования ионов меди (II) и цинка (II) с использованием Pb-селективного электрода (Pb-ИСЭ) в качестве индикаторного. Потенциометрическое определение смеси ионов меди (II) и цинка (II), дающих комплексоны близкой прочности, проводили с варьированием кислотности среды в процессе титрования. В более кислой среде (ацетатный буфер) проводили определение ионов меди (II), в щелочной среде (аммиачный буфер) фиксировали второй скачок титрования, соответствующий суммарному содержанию ионов меди (II) и цинка (II). Предлагаемый способ отдельного определения ионов меди (II) и цинка (II) в их смеси апробирован на данных титрования модельных бинарных смесей и реальном объекте.

Выводы. Предложен простой и экспрессный способ дифференцированного потенциометрического определения ионов Cu (II) и Zn (II) при совместном присутствии с использованием Pb-ИСЭ в качестве индикаторного электрода. Величина относительного стандартного отклонения определяемых ионов в модельных бинарных смесях при содержании в 50 мл анализируемого раствора от 1 до 25 мг каждого компонента смеси, находится в пределах от 0,006 до 0,2. Достоинство предлагаемого способа состоит в одновременном определении по данным титрования одной аликвотной части раствора двух компонентов смеси без их предварительного разделения. Результаты потенциометрического анализа латуни Лс59-1 на содержание основных компонентов предлагаемым способом не показали статистически значимых расхождений с данными, полученными по стандартным методикам. Применение метода линеаризации для обработки кривых потенциометрического титрования повышает селективность титриметрических определений, посредством варьирования кислотности среды в процессе титрования, что расширяет возможности потенциометрического определения многокомпонентных систем в целом.

Ключевые слова:

Потенциометрическое титрование, определение меди, определение цинка, компьютерная обработка данных титрования, метод линеаризации.

Введение

Комплексонометрия в сочетании с инструментальной индикацией точки эквивалентности является чувствительным и надёжным методом анализа сплавов, почв, стройматериалов, технологических растворов и др. Из обширного круга хелатообразующих реагентов в практике химического анализа наибольшее применение нашёл комплексон

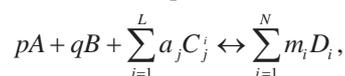
III (ЭДТА). В настоящее время прямо или косвенно данным реагентом можно определить более 40 неорганических катионов, а также анионов неметаллов и некоторых функциональных группировок в органических соединениях [1]. Такая универсальность является большим достоинством титранта, однако остаётся вопрос о его недостаточной селективности [2]. В практических целях комплексо-

метрическое последовательное титрование многокомпонентных смесей с потенциометрической индикацией почти не используется [3]. Основные причины заключаются в низкой селективности реагента, отсутствии электродов, чувствительных и селективных к ЭДТА и другим комплексонам, поэтому вызывает интерес возможность использования в практике анализа более широкого круга ионоселективных электродов (ИСЭ).

С каждым годом увеличивается число вновь созданных химических сенсоров [4–6], однако количество коммерчески доступных ограничено. Промышленно выпускаемые металл-селективные электроды с менее строгой функцией к своим ионам находят применение в потенциометрическом титровании. Известно, что Cu^{2+} , Ag^+ , Fe^{3+} , Hg^{2+} и др. влияют на потенциал Рb-ИСЭ [7, 8]. Титрование «чужих» ионов с использованием металл-ИСЭ халькогенидных электродов было опробовано нами в практике осадительного титрования [9]. Этот же приём был исполнен и в настоящей работе в отношении реакций комплексометрического титрования. Таким образом, могут быть расширены границы использования одного и того же ионоселективного электрода для решения разных задач в потенциометрии. Количественное определение цинка (II) и меди (II) в аналитических лабораториях проводят различными химическими, физическими и физико-химическими методами [10–12]. Лидирующее место согласно количеству публикаций за последние годы занимают физические методы анализа, многие из которых требуют наличия дорогостоящей аппаратуры, реактивов, введения дополнительной стадии пробоподготовки анализируемой пробы. Электрохимические методы анализа, несмотря на бурное развитие более новых методов, остаются актуальными благодаря высокой точности и общедоступности. Значительными преимуществами потенциометрии среди других аналитических методов контроля являются: возможность использования при непрерывном контроле, простота анализа, приборная обеспеченность, легкость автоматизации.

Использование компьютерной обработки данных, математических и статистических методов для описания химических процессов в значительной степени позволяет расширить возможности метода анализа, увеличить объём информации о материале исследуемой системы, прогнозировать её поведение в различных условиях, повысить чувствительность и селективность анализа в целом. Для прогнозирования возможности последовательного титрования ионов металлов при совместном присутствии в литературе предложено несколько теоретических подходов, основанных на математическом описании процесса титрования [13–16]. Цель исследования заключается в разработке способа комплексометрического дифференцированного определения меди (II) и цинка (II) из одного раствора методом потенциометрического титрования с использованием метода фрагментар-

ной линейаризации для обработки данных. Метод линейаризации базируется на использовании наиболее полной модели процесса титрования, построенной комбинированием закона действия масс с уравнением материального баланса и связи. Для упрощения вычислительного алгоритма математическую модель процесса логарифмической кривой титрования преобразуют заменой переменных в линейную регрессионную характеристику $y = V_{\text{eq}}x + y_0$, угловой коэффициент которой с точностью оценки методом наименьших квадратов численно равен объёму титранта в точке эквивалентности $V_{\text{eq}} = dy/dx$, а отрезок y_0 , отсекаемый на оси ординат, пропорционален константе равновесия. Одно из преимуществ метода линейаризации состоит в том, что он позволяет получить не только более точные результаты титрования, но и рассчитывать их по любому участку кривой титрования. В работах [17–19] предлагаемый метод фрагментарной линейаризации апробирован на данных потенциометрического осадительного титрования, в настоящем сообщении данный метод развит применительно к обработке данных комплексометрического титрования. Уравнение кривой потенциометрического титрования нисходящего типа по реакции комплексообразования:



где A – титруемая частица; B – титрующая частица; C_j – другие компоненты; D_i – продукты реакции, можно представить в виде уравнения прямой

$$y = V_{\text{eq}}x + y_0.$$

Используя замену переменных

$$x = R_A^\lambda \left(\frac{\beta}{1 - \beta R_A} \right)^{v-1},$$

$$y = \frac{xV}{1 - \beta R_A},$$

где

$$\lambda = \frac{p}{q}, \quad v = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{q},$$

отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат

$$y_0 = \frac{V_0 (K\eta)^{1/q}}{p^v c_i c_0^{\lambda-v}}, \quad (1)$$

где c_t – молярность титранта по частице B , а

$\eta = \sum_{i=1}^N m_i^m$; p, q, a_j – стехиометрические коэффици-

енты; $R_A = \exp[z(E - E_0)/\psi]$ – безразмерная переменная, характеризующая изменение равновесной концентрации иона-титранта относительно его концентрации в рабочем растворе c_i ; z – зарядовое число титруемого иона A ; E – электродный потенциал при добавлении V титранта; E_0 – его исходное значение при $V=0$; $\beta = 1 + (V/V_0)$ – коэффициент разбавления раствора в процессе титрования; V_0 – на-

чальный объем титруемого раствора; V_{eq} – эквивалентный объем титранта; $\psi = RT/F$ – коэффициент Нернста; c_0 – концентрация иона A ; c_t – концентрация титранта по иону B . Параметры V_{eq} и y_0 линеаризованной модели кривой титрования могут быть рассчитаны взвешенным методом наименьших квадратов как коэффициенты регрессии y на x . Значение K (2) константы диссоциации комплекса A_pB_q находится решением уравнения (1) в сочетании со стехиометрическим соотношением

$$qc_0V_0 = pc_tV_{\text{eq}},$$

$$K = \frac{p^p}{\eta} \left[y_0 \left(\frac{V_{\text{eq}}}{q} \right)^{\lambda - \nu} \left(\frac{c_t}{V_0} \right)^{\lambda - \nu + 1} \right]^q. \quad (2)$$

При побочном взаимодействии компонентов A и B с посторонними частицами (например, при титровании в буферных средах) термодинамическая константа K должна быть заменена на условную константу K' , связанную с первой соотношением $K' = K\Phi_A^p\Phi_B^q$, где Φ_A и Φ_B – функции закомплексованности для компонентов A и B .

Нередко начальный участок кривой титрования имеет аномальную форму, не позволяющую измерить начальный потенциал E_0 . Это затруднение можно преодолеть, рассчитав E_0 по адекватному участку кривой титрования методом подбора как величину, обеспечивающую максимальную тесноту линейной связи между переменными x и y , характеризуемую коэффициентом корреляции r . В качестве критериальной функции используют разность $1 - r^2$, добиваясь ее минимизации. Для получения правильных результатов анализа с использованием предложенной модели должны соблюдаться определенные условия титрования, обеспечивающие адекватность модели [20]. Вычислительный алгоритм предлагаемого метода апробирован на данных титрования индивидуальных ионов Cu (II) , Zn (II) раствором комплексона III и их бинарных смесей с помощью компьютерной программы DIGTITR LOG B, составленной на языке Turbo-Pascal.

Приборы и методы исследования

Экспериментальные кривые титрования регистрировали цифровым иономером И-135 в режиме измерения ЭДС; диапазон измерения от -1999 до $+1999$ мВ. Пределы допускаемых значений абсолютной погрешности в режиме измерения ЭДС ± 1 мВ. В работе использовали в качестве индикаторных электродов: халькогенидные мембранные ионоселективные Pb-ИСЭ , Cd-ИСЭ электроды (фирма «Krytur») в паре с хлоридсеребряным электродом сравнения ЭВЛ-1МЗ. Раствор титранта добавляли из пневматической полумикробюретки порциями по $0,2$ мл, уменьшая их до $0,03$ – $0,04$ мл вблизи точки эквивалентности. После каждой добавки титранта и перемешивания раствора магнитной мешалкой выжидали, пока не стабилизируются показания иономера, после чего записывали величину достигнутого равновесного потенциа-

ла. Для поддержания заданного значения pH использовали соответствующие буферные растворы. Стандартные растворы Cu (II) и Zn (II) готовили растворением точной навески металлов в разбавленной (1:3) азотной кислоте. Модельные растворы меди (II), цинка (II), и их смесей с соотношением компонентов вплоть до 10:1 в концентрационном диапазоне $1 \cdot 10^{-2}$... $1 \cdot 10^{-4}$ М готовили путем последовательного разбавления исходного более концентрированного стандартного раствора. В качестве фонового электролита для поддержания постоянной ионной силы применяли $0,05$ М раствор KNO_3 .

Для проверки разработанной методики использовали производственный образец медного сплава Лс59–1. Пробоподготовку и контрольное определение основных компонентов сплава в данном случае проводили по методикам ГОСТ 1652–77, предложенным для анализа медно-цинковых сплавов [21].

Результаты и их обсуждение

При потенциометрическом титровании неразделенных смесей обычно используют индикаторный электрод, чувствительный к тому компоненту смеси, который образует в данных условиях наиболее устойчивый комплекс, либо проводят титрование по методу вытеснения [22]. Чувствительность ИСЭ-селективных электродов к реагентам-комплексантам, по-видимому, обусловлена образованием в приповерхностном слое электрода прочных комплексных соединений с катионами металлов. В работе [23] теоретически обоснована и практически реализована возможность титрования органических комплексантов растворами Cu (II) и Zn (II) с использованием Cu-ИСЭ и Zn-ИСЭ . В настоящей работе исследована возможность использования Pb-ИСЭ и Cd-ИСЭ в качестве индикаторных электродов для комплексонометрического определения ионов меди (II) и цинка (II). Лучшими характеристиками по предварительным данным эксперимента обладает Pb-ИСЭ , что можно объяснить образованием более устойчивых комплексантов в приповерхностном слое Pb-ИСЭ электрода за счёт явления адсорбции. Результаты титрования ионов, полученные с использованием Cd-ИСЭ , расходятся в большей степени. В процессе комплексонометрического титрования двухкомпонентных модельных растворов Cu (II) и Zn (II) на кривых титрования, полученных с использованием Pb-ИСЭ в качестве индикаторного, наблюдается один скачок потенциала, соответствующий суммарному определению ионов, так как комплексы ЭДТА с медью и цинком имеют близкие константы устойчивости ($\lg \beta_{\text{Cu (II)}} = 18,8$ и $\lg \beta_{\text{Zn (II)}} = 16,26$) [24]. Следует отметить, что константы устойчивости комплексантов меди (II) и цинка (II) зависят от кислотности среды. Этилендиаминтетраацетаты металлов с высокими значениями условных констант устойчивости остаются достаточно прочными и в сильно-кислых средах, в то время как менее устойчивые частично или полностью диссоциируют на ионы.

Таким образом, ион водорода является простейшим маскирующим реагентом, поскольку он понижает условную константу устойчивости маскируемого иона [22]. Варьирование pH среды позволяет селективно титровать в кислой среде один катион в присутствии других и затем, после повышения pH, следующую группу катионов, комплексопаты которых менее устойчивы. На рис. 1 зависимость 1 представляет типичную кривую титрования модельного раствора Cu (II) на фоне ацетатного буферного раствора с использованием Рв-ИСЭ в качестве индикаторного электрода. Кривые титрования имеют достаточно большой скачок потенциала в области точки эквивалентности и хорошо воспроизводятся. Зависимость 2 (рис. 1) соответствует титрованию раствора цинка (II) в тех же условиях. Кривая титрования имеет аномальный вид, потенциометрическое определение цинка не представляется возможным, что можно объяснить образованием более слабого комплекса цинка (II) с ЭДТА.

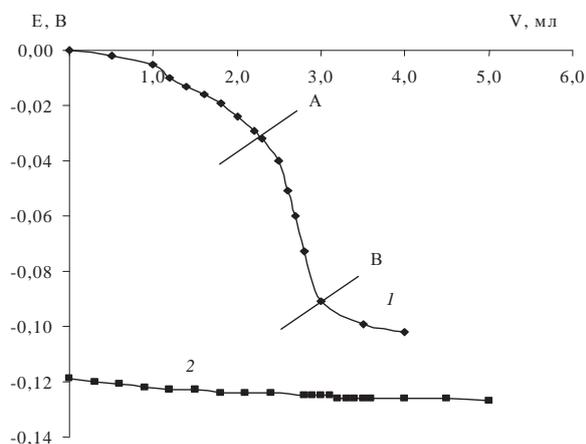


Рис. 1. Кривые потенциометрического титрования модельных растворов Cu (II) и Zn (II) раствором ЭДТА на фоне ацетатного буферного раствора (зависимость 1 соответствует титрованию 50 мл раствора, содержащего 0,0027 М Cu (II) раствором 0,05 М раствором ЭДТА, зависимость 2 соответствует титрованию раствора Zn (II) при тех же условиях и концентрациях)

Fig. 1. Curves of potentiometric titration of Cu (II) and Zn (II) model solutions with EDTA solution affected by the acetate buffer solution (dependence 1 corresponds to titration of 50 ml of the solution, containing 0,0027 M Cu (II) with the solution of 0,05 M solution EDTA, dependence 2 corresponds to titration of Zn (II) solution under the same conditions and at the same concentrations)

Для повышения точности результатов анализа кривые титрования обрабатывали методом фрагментарной линеаризации с помощью компьютерной программы DIFTITR LOG B, используя внутренние точки их ниспадающих ветвей. При обработке точек скачка потенциала (участок АВ) на кривой титрования потенциометрического титрования, представленной на рис. 1, зависимость 1, найдено, что теснота линейной связи между переменными x и y характеризуется коэффициентом

корреляции $r=0,999998$ и максимальна при $E_t=-0,222$ В. При этом наклон линейной характеристики $\text{tg}\alpha=V_{\text{eq}}(\text{Cu})=(2,722\pm 0,026)$ мл с надежностью $P=0,95$, что отличается от теоретического значения 2,70 мл на 0,8 %. Близость коэффициента корреляции к 1 убедительно свидетельствует об адекватности модели процесса титрования опытными данными.

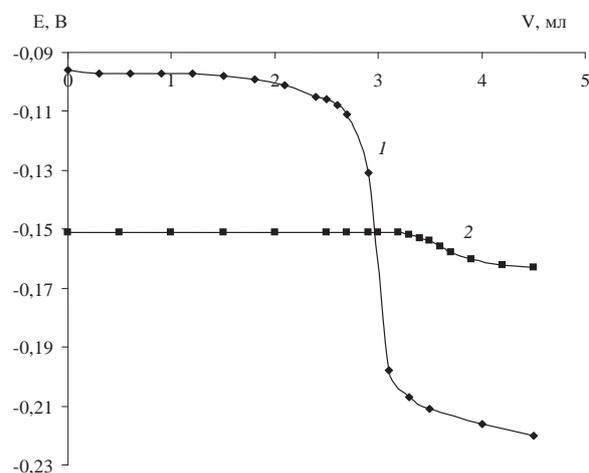


Рис. 2. Кривые потенциометрического титрования модельных растворов Cu (II) и Zn (II) раствором ЭДТА на фоне аммиачного буферного раствора (зависимость 1 соответствует титрованию 50 мл раствора, содержащего 0,0027 М Cu (II) раствором 0,05 М раствором ЭДТА, зависимость 2 соответствует титрованию 50 мл раствора, содержащего 0,0015 М Zn (II) раствором 0,02176 М ЭДТА)

Fig. 2. Curves of potentiometric titration of Cu (II) and Zn (II) model solutions with EDTA solution affected by the ammonia buffer solution (dependence 1 corresponds to titration of 50 ml of the solution, containing 0,0027 M Cu (II) with the solution of 0,05 M solution EDTA, dependence 2 corresponds to titration of 50 ml of the solution, containing 0,0015 M Zn (II) with the EDTA solution 0,02176 M)

С увеличением pH (рис. 2, зависимость 2) на кривой титрования появляется небольшой скачок потенциала, который соответствует титрованию раствора цинка (II). Тем не менее, метод линеаризации позволяет оценить эквивалентный объем титранта. Угловым коэффициентом линейной характеристики титрования $\text{tg}\alpha=V_{\text{eq}}(\text{Zn})=(3,447\pm 0,004)$ мл с надежностью $P=0,95$, что отличается от теоретического значения 3,36 на 2,6 %. На кривой титрования раствора меди (II) (рис. 2, зависимость 1) в области точки эквивалентности наблюдается достаточно высокий скачок потенциала. В результате обработки участка скачка потенциала найдено, что теснота линейной связи между переменными x и y характеризуется коэффициентом корреляции $r=0,999999$ и максимальна при $E_t=-0,251$ В. При этом наклон линейной характеристики $\text{tg}\alpha=V_{\text{eq}}(\text{Cu})=(2,766\pm 0,004)$ мл с надежностью $P=0,95$, что отличается от теоретического значения 2,70 мл на 2,4 %. Образование более устойчивых комплексопатов меди (II) и цинка (II) в амми-

ачных средах, по сравнению с ацетатными, подтверждается литературными данными [22]. По-видимому, это связано с образованием смешанных комплексов типа $Zn[NH_3]_xY^{2-}$, которые более устойчивы, чем простые комплексоны ZnY^{2-} [25]. Результаты потенциометрического титрования индивидуальных $1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ М растворов меди (II) и цинка (II) при указанных условиях хорошо воспроизводятся ($Sr < 0,04$) и не содержат статистически значимых расхождений. Очередность титрования ионов в смесях зависит от констант устойчивости комплексов с металлом [2]. Принимая во внимание, что ионы меди (II) образуют с ЭДТА более устойчивые комплексы, сначала в более кислой среде (ацетатный буфер рН) проводили определение ионов меди (II), затем добавляли в титруемый раствор аммиак до рН9, и фиксировали второй скачок титрования, соответствующий суммарному содержанию ионов меди (II) и цинка (II). Предлагаемый способ апробирован на титровании бинарных модельных растворов меди и цинка с различным содержанием компонентов. Проверку правильности определения проводили методом «введено-найденно». Результаты титрования модельных смесей меди (II) и цинка (II) представлены в табл. 1.

При содержании от 1 до 25 мг каждого компонента смеси в 50 мл анализируемого раствора величина относительного стандартного отклонения находится в пределах от 0,006 до 0,2, расхождение между истинным значением и найденным по *t*-критерию незначимо на фоне случайного разброса.

На рис. 3 представлена кривая потенциометрического титрования раствора сплава меди и цинка марки Лс59–1 с чётким проявлением двух скачков и фрагменты линеаризации её участков АВ и CD. При обработке точек внутренней зоны кривой по-

тениометрического титрования, представленной на рис. 3, максимальная теснота линейной связи между регрессионными переменными *x* и *y* характеризуется коэффициентом корреляции $r=0,999$. Как видно, точки титрования в координатах *x-y* хорошо укладываются на прямую линию (коэффициент корреляции регрессии *y* на *x* $r=0,999$ и $r=0,999$). Близость коэффициента корреляции к 1 убедительно свидетельствует об адекватности процессов моделирования опытным данным. Теснота линейной связи между регрессионными переменными *x* и *y* максимальна при $E_t = -0,160$ В – для участка АВ и $E_t = -0,280$ В – для участка CD. Наклон линии регрессии $dy/dx = tg\alpha = V_{eq} = (3,236 \pm 0,076)$ мл, для первого скачка титрования и $dy/dx = tg\alpha = V_{eq} = (5,170 \pm 0,013)$ мл – для второго.

Таблица 1. Результаты раздельного потенциометрического определения меди и цинка в модельных бинарных смесях при ($P=0,95$; Pb-СЭ; $n=3$)

Table 1. Results of separate copper and zinc potentiometric determination in model binary mixtures at ($P=0,95$; Pb-СЭ; $n=3$)

Ион Ion	Соотношение Ratio	Введено, мг Added, mg	Найдено, мг Found, mg	Sr
Cu	1:1	6,2	6,3±0,8	0,05
Zn		6,2	5,9±0,5	0,04
Cu	1.5:1	1,6	1,7±0,2	0,05
Zn		1,1	1,1±0,1	0,04
Cu	1:2	4,9	4,8±0,5	0,04
Zn		10,2	10,2±0,4	0,2
Cu	1:5	4,9	5,1±0,4	0,3
Zn		25,6	25,5±0,4	0,006
Cu	5:1	12,1	12,4±0,5	0,02
Zn		2,8	3,0±0,2	0,02
Cu	10:1	17,2	17,1±0,2	0,05
Zn		1,9	2,0±0,5	0,1

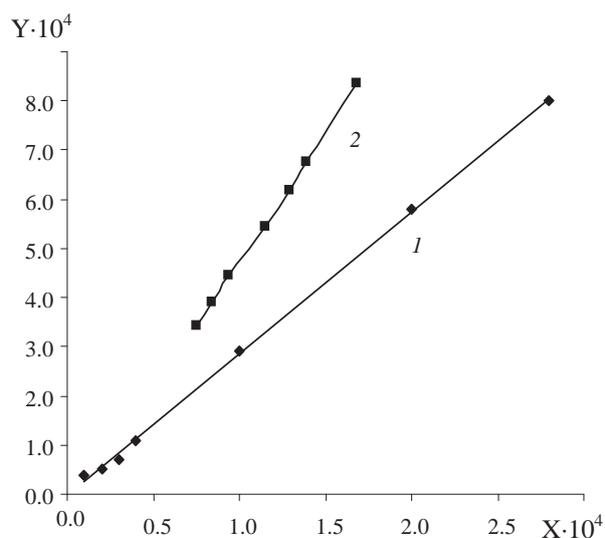
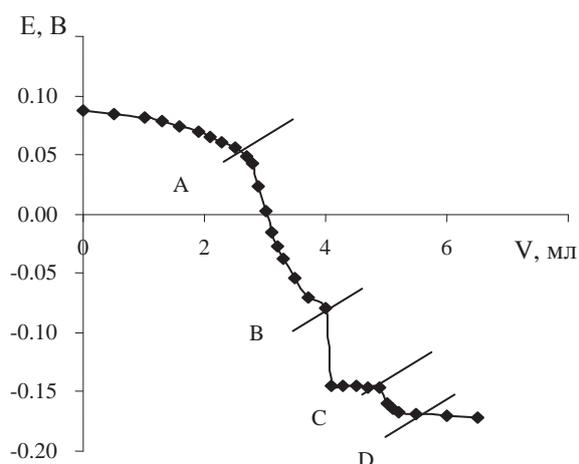


Рис. 3. Кривая потенциометрического титрования 50 мл раствора сплава, содержащего Zn (II) и Cu (II) раствором 0,0125 М ЭДТА и графики линеаризации фрагментов АВ (1) и CD (2)

Fig. 3. Curve of potentiometric titration of 50 ml of the alloy solution, containing Zn (II) and Cu (II) with the solution of 0,0125 M EDTA and graphs of linearization of fragments АВ (1) и CD (2)

Одно из преимуществ метода линеаризации состоит в том, что он позволяет получить не только более точные результаты титрования, но и рассчитывать их по любому участку кривой титрования, в т. ч. не включающему точку эквивалентности. Однако наилучшие результаты получали при обработке точек внутренней зоны ниспадающей ветви кривой титрования, где значения регрессионных переменных изменяются на несколько порядков и аналитический сигнал наиболее информативен. В табл. 2 представлены результаты анализа сплава предлагаемым методом в сопоставлении с данными, предложенным для анализа медно-цинковых сплавов ГОСТ 1652–77 [21].

Таблица 2. Сравнение результатов анализа сплава марки Лс59–1 ($P=0,95$; $n=3$)

Table 2. Comparison of the results of analysis of the alloy of brand Ls59–1 ($P=0,95$; $n=3$)

Определяемый компонент Determined component	Найдено, мас. % Found, wt. %		F-критерий F-criterion	t-критерий t-criterion
	по ГОСТ [10] by the SS [10]	потенциометрически by potentiometry		
Cu (II)	59,6±1,0	58,6±1,0	1,9≤19,2*	2,05≤4,60*
Zn (II)	39,8±3,6	38,5±1,5	3,46≤19,2*	1,3≤4,60*

* – табличные значения.

* are the table values.

В потенциометрическую ячейку помещали 50 мл раствора сплава марки Лс59–1, содержащего основные компоненты ионы меди (II) и цинка (II), добавляли ацетатный буфер, фоновый электролит KNO_3 и титровали в кислой среде ионы меди (II) раствором ЭДТА. В процессе титрования раствор непрерывно перемешивали на магнитной мешалке, дожидаясь между добавлениями титранта устойчивых показаний иономера. После завершения реакции комплексообразования меди (II) (вы-

ход первого скачка потенциала на плато) в раствор добавляли раствор аммиака для создания щелочной среды, продолжали титровать ионы цинка (II), и регистрировали второй скачок потенциала, соответствующий суммарному содержанию металлов.

Результаты потенциометрического анализа сплава Лс59–1 предлагаемым способом не показали статистически значимых расхождений с данными, полученными по стандартным методикам. Правильность разработанной методики проверена сопоставлением результатов определения меди (II) и цинка (II) по критериям Фишера и Стьюдента. Полученные результаты анализа свидетельствуют об однородности дисперсий и отсутствии статистически значимых различий между ними.

Заключение

Предложен простой и экспрессный способ дифференцированного потенциометрического определения ионов Cu (II) и Zn (II) при совместном присутствии с использованием Рb-ИСЭ в качестве индикаторного электрода. Величина относительного стандартного отклонения определяемых ионов в модельных бинарных смесях при содержании в 50 мл анализируемого раствора от 1 до 25 мг каждого компонента смеси находится в пределах от 0,006 до 0,2. Достоинство предлагаемого способа состоит в одновременном определении по данным титрования одной аликвотной части раствора двух компонентов смеси без их предварительного разделения. Результаты потенциометрического анализа латуни Лс59–1 на содержание основных компонентов предлагаемым способом не показали статистически значимых расхождений с данными, полученными по стандартным методикам. Применение метода линеаризации для обработки кривых потенциометрического титрования повышает эффективность титриметрических определений, а варьирование кислотности среды в процессе титрования увеличивает селективность титранта, что расширяет возможности потенциометрического определения многокомпонентных систем в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваецбах Г., Флашка Г. Комплексометрическое титрование. – М.: Химия, 1970. – 360 с.
2. Юрист И.М., Талмуд М.М. Селективное комплексометрическое титрование. – М.: Наука, 1993. – 232 с.
3. Некоторые аспекты реакционной способности динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) / Р.А. Терентьев, В.К. Чеботарев, Е.Г. Ильина и др. // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 3–1 (71). – С. 143–147.
4. Неудачина Л.К., Петрова Ю.С., Раков Д.А. Селективное потенциометрическое определение серебра в оловянных и оловянно-свинцовых припоях с индикаторным модифицированным угольно-пастовым электродом // Аналитика и контроль. – 2014. – Т. 18. – № 3. – С. 316–327.
5. Мохаммадзадех Кахки Р. Применение наночастиц в ионоселективных электродах для потенциометрических определений // Электрохимия. – 2013. – Т. 49. – № 5. – С. 515–524.
6. Химические сенсоры и их системы / Ю.Г. Власов, Ю.Е. Ермоленко, А.В. Легин, А.М. Рудницкая, В.В. Колодников // Журнал аналитической химии. – 2010. – Т. 83. – № 9. – С. 900–919.
7. Боган В.И., Ребезов М.Б. Совершенствование потенциометрического метода определения токсичных элементов на примере определения свинца, кадмия и меди // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2014. – Т. 2. – № 3. – С. 53–60.
8. Васильев В.Г., Фомина Л.В., Бензосюк С.А. Возможности потенциометрического определения ионов меди и цинка при совместном присутствии // Ангарская государственная техническая академия. – 2011. – Т. 1. – № 1–1. – С. 11–15.
9. Марьянов Б.М., Зарубин А.Г., Шумар С.В. Применение прямой регрессии для обработки кривых дифференцированного потенциометрического титрования бинарной смеси гетероветных ионов по реакциям осаждения // Журнал аналитической химии. – 2003. – Т. 58. – № 4. – С. 342–346.

10. Sardans J., Montes F., Penuelas J. Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry to Determine As, Cd, Cr, Cu, Hg, and Pb in Soils and Sediments: a Review and Perspectives // Soil and Sediment Contamination. – 2011. – № 20. – P. 447–491.
11. Jen-Fon J., Chih-Shih Ch. Determination of metal ions as EDTA complexes by reversed-phase ion-pair liquid chromatography // Analytica Chimica Acta. – 1992. – V. 270. – № 8. – P. 55–61.
12. Flow injection determination of copper in concentrated electrolytes with potentiometric detection / V. Krawczynski, T. Krawczyk, M. Trojanowicz, A. Hulanicki // Anal. Chem. – 1988. – V. 33. – № 1. – P. 69–73.
13. Чеботарев В.К. Прогнозирование в титриметрических методах анализа с использованием реакций комплексообразования и осаждения: монография. – Барнаул: АГУ, 1999. – 144 с.
14. Бердник И.В., Бердник В.В. Метод определения точки эквивалентности по результатам потенциометрических измерений // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 34. – № 6. – С. 91–97.
15. Кропотов В.А. Аппроксимация кривых комплексонометрического и седиметрического титрования логарифмическими зависимостями // Журнал аналитической химии. – 1998. – Т. 53. – № 6. – С. 566–570.
16. Калашников Д.В., Вершинин В.И. Компьютерное моделирование комплексонометрического титрования смесей металлов // Журнал аналитической химии. – 2001. – Т. 56. – № 1. – С. 12–17.
17. Шумар С.В. Потенциометрическое определение серебра с использованием математической модели процесса // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 116–119.
18. Марьянов Б.М., Шумар С.В., Зарубин А.Г. Определение основного состава полупроводникового теллурида кадмия потенциометрическим титрованием диэтилдитиокарбаматом натрия // Аналитика и контроль. – 2002. – Т. 6. – № 3. – С. 281–284.
19. Анализ проводникового сплава Pd–Ag–Cu методом потенциометрического титрования / С.В. Шумар, Б.М. Марьянов, В.В. Смирнова, А.Г. Зарубин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71. – № 6. – С. 17–20.
20. Марьянов Б.М. Метод линеаризации в инструментальной титриметрии. – Томск: Изд-во. Том. ун-та, 2001. – 158 с.
21. ГОСТ 1652–77. Сплавы медно-цинковые. Методы анализа. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 11 с.
22. Flaschka H. EDTA titrations: an introduction to theory and practice. – NY; London: Pergamon Press, 1964. – 138 p.
23. Згнетов А.В., Вершинин В.И. Компьютерное моделирование комплексонометрического титрования органических веществ // Вестник Омского университета. – 2006. – № 3. – С. 42–44.
24. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 448 с.
25. Pribil R. Analytical applications of EDTA and related compounds. – Oxford: Pergamon Press, 1972. – 368 p.

Поступила 24.04.2015 г.

UDC 543.554.4

COMPLEXOMETRIC DIFFERENTIAL DETERMINATION OF COPPER (II) AND ZINC (II) USING MATHEMATICAL MODEL OF THE TITRATION PROCESS

Svetlana V. Shumar,

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

Mikhail A. Gavrilenko,

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

Elena A. Kuzminskaya,

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

Relevance of the research is caused by the necessity to improve the method of potentiometric analysis of multicomponent mixtures. **The main aim of the study** consists in development of the method for complexometric-differentiated determination of copper (II) and zinc ions (II) from a single solution by potentiometric titration with computer processing of the titration method results by fragmentary linearization.

The methods used in the study: titration with visual indication of the equivalence point, potentiometry, computer processing the results of the titration method fragmented linearization. For separate determination of metals, which give the close strength complexonates, the authors have proposed the method of potentiometric titration with variation of the medium acidity at titration. The data of potentiometric titration were processed by linearization. The method is based on construction of mathematical model of the logarithmic titration curve, which is converted by the change of variables into linear regression response.

The result. The authors studied the conditions of the differentiated complexometric titration of copper (II) and ions zinc (II) using Pb-selective electrode (ISE-Pb) as the indicator one. Potentiometric determination of the mixture of copper (II) and zinc ions (II), which give the close strength complexonates, was carried out by varying the medium acidity at titration. In more acidic medium (acetate buffer) the authors defined copper ions and in alkaline medium (ammonium buffer) they fixed the second titration discontinuity corresponding to the total content of copper and zinc ions. The proposed method for the separate determination of copper (II) and zinc ions (II) under their mixture was tested on the titration data of the model binary mixtures and on real object.

Conclusions. The authors proposed the simple method of the differentiated potentiometric determination of Cu (II) and Zn (II) ions at joint presence using ISE-Pb as the indicator electrode. The value of the relative standard deviation of the examined ions in the model binary mixtures is within the range from 0,006 to 0,2 at content of each component of the mixture from 1 to 25 mg in 50 ml of the exa-

mined solution. The advantage of the method proposed is in simultaneous determination of one aliquot part of the solution of two components of the mixture without their preliminary separation by the titration data. The results of latter Ls-59-1 potentiometric analysis for the content of basic components by the proposed methods did not show statistically significant differences with the data obtained according to the standard techniques. The application of linearization for processing the curves of potentiometric titration increases selectivity of titrimetric determinations by varying the medium acidity at titration. This extends the possibilities of potentiometric determination of multi-component systems.

Key words:

Potentiometric titration, zinc determination, copper determination, computer processing of titration data, linearization method.

REFERENCES

- Shvartsenbakh G., Flashka G. *Kompleksonometricheskoe titrovaniye* [Complexometric titration]. Moscow, Khimiya Publ., 1970. 360 p.
- Iurist I.M., Talmud M.M. *Selektivnoye kompleksometricheskoe titrovaniye* [Selective complexometric titrations]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 232 p.
- Terentev R.A., Chebotarev V.K., Ilina E.G. Nekotorye aspekty reaktsionnoy sposobnosti dinatrievoy soli etilendiamintetraakusnoy kisloty (EDTA) [Some aspects of reactivity of the disodium salt of ethylenediamine tetra acetic acid (EDTA)]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3-1 (71), pp. 143–147.
- Neudachina L.K., Petrova Yu.S., Rakov D.A. Selektivnoye potentsiometricheskoe opredeleniye serebra v olovyannykh i olovyannosvintsovykh priyipoyakh s indikatornym modifitsirovannym ugolno-pastovym elektrodom [Selective potentiometric determination of silver in the tin and tin-lead solder indicator modified carbon-paste electrode]. *Analitika i kontrol*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 316–327.
- Mokhammadzadekh Kakhi R. Primeneniye nanochastits v ionoselektivnykh elektrodakh dlya potentsiometricheskikh opredeleniy [Applications of nanoparticles in ion-selective electrodes for potentiometric determination]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 515–524.
- Vlasov Yu.G., Ermolenko Yu.E., Legin A.V., Rudnitskaya A.M., Kolodnikov V.V. Chemical Sensors and Their Systems. *Journal of Analytical Chemistry*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 880–898.
- Bogdan V.I., Rebezov M.B. Sovershenstvovanie potentsiometricheskogo metoda opredeleniya toksichnykh elementov na primere opredeleniya svintsya, kadmiya i medi [Perfection of potentiometric method for determining certain toxic elements by the example of lead, cadmium and copper]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i bioteshnologii*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 53–60.
- Vasilev V.G., Fomina L.V., Benznosyuk S.A. Vozmozhnosti potentsiometricheskogo opredeleniya ionov medi i tsinka pri sovместnom prisutstvii [Possibilities of potentiometric determination of copper and zinc ions with joint presence]. *Angarskaya gosudarstvennaya tekhnicheskaya akademiya*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 11–15.
- Mareanov B.M., Zarubin A.G., Shumar S.V. Primeneniye pryamoy regressii dlya obrabotki krivyykh potentsiometricheskogo titrovaniya binarnoy smesi geterovalentnykh ionov po reaktsiyam osazhdeniya [Use of Linear Regression for Processing the Curves of Differential Potentiometric Titration of a Binary Mixture of Heterovalent Ions Using Precipitation Reactions]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2003, vol. 58, no. 4, pp. 300–304.
- Sardans J., Montes F., Penuelas J. Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry to Determine As, Cd, Cr, Cu, Hg, and Pb in Soils and Sediments: A Review and Perspectives. *Soil and Sediment Contamination*, 2011, no. 20, pp. 447–491.
- Jen-Fon J., Chih-Shih Ch. Determination of metalions as EDTA complexes by reversed-phase ion-pair liquid chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 1992, vol. 270, no. 8, pp. 55–61.
- Krawczynski V., Krawczyk T., Trojanowicz M., Hulanicki A. Flow injection determination of copper in concentrated electrolytes with potentiometric detection. *Anal. Chem.*, 1988, vol. 33, no. 1, pp. 69–73.
- Chebotarev V.K. *Prognozirovaniye v titrimetricheskikh metodakh analiza s ispolzovaniem reaktsii kompleksobrazovaniya i osazhdeniya* [Prediction in titration analysis using precipitation and complexation reactions]. Barnaul, Alt. University Publ., 1999. 144 p.
- Berdnik I.V., Berdnik V.V. Metod opredeleniya tochki ekvivalentnosti po rezultatam potentsiometricheskikh izmereniy [Method of determining the equivalence point by the results of potentiometric measurements]. *Butlerovskie soobshcheniya*, 2013, vol. 34, no. 6, pp. 91–97.
- Kropotov V.A. Approksimatsiya krivyykh kompleksometricheskogo i sedimentricheskogo titrovaniya logarifmicheskimi zavisimostyami [Approximation curves complexometric and precipitation titration by logarithmic dependence]. *Journal of Analytical Chemistry*, 1998, vol. 53, no. 6, pp. 566–570.
- Kalashnikov D.V., Vershinin V.I. Computer Simulation of the Chelatometric Titration of Metal Mixtures. *Journal of Analytical Chemistry*, 2001, vol. 56, no. 1, pp. 8–12.
- Shumar S.V. Potentsiometricheskoe opredeleniye serebra s ispolzovaniem matematicheskoy modeli protsesa [Potentiometric determination of silver using a mathematical model of the process]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 3, pp. 116–119.
- Maryanov B.M., Shumar S.V., Zarubin A.G. Opredeleniye osnovnogo sostava poluprovodnikovogo tellurida kadmiya potentsiometricheskim titrovaniem dietilditiokarbamatom natriya [Use of sodium diethyldithiocarbamate as the potentiometric titrant while analyzing transistorized cadmium telluride on basic components content]. *Analitika i kontrol*, 2002, vol. 6, no. 3, pp. 281–284.
- Shumar S.V., Maryanov B.M., Smirnova V.V., Zarubin A.G. Analiz poluprovodnikovogo splava Pd-Ag-Cu metodom potentsiometricheskogo titrovaniya [Analysis of Pd-Ag-Cu conducting alloy by potentiometric titration method]. *Factory laboratory. Diagnosis of materials*, 2005, vol. 71, no. 6, pp. 17–20.
- Maryanov B.M. *Metod linearizatsii v instrumentalnoi titrimetrii* [The linearization method in instrumental titrimetry]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2001. 156 p.
- GOST 1652-77. *Splavy medno-tsinkovye. Metody analiza* [Russian State Standard 1652-77. Copper-zinc alloys. Methods for determination of copper]. Moscow, Russian State Standard Publ., 1992. 11 p.
- Flaschka H. EDTA titrations: an introduction to theory and practice. NY; London, Pergamon Press, 1964. 138 p.
- Zgnetov A.V., Vershinin V.I. Kompyuternoe modelirovaniye kompleksometricheskogo titrovaniya organicheskikh veshchestv [Computer simulation of complexometric titration of organic substances]. *Vestnik Omskogo universiteta*, 2006, no. 3, pp. 42–44.
- Lurye Yu.Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of Analytical Chemistry]. Moscow, Alyans Publ., 2013. 448 p.
- Pribil R. *Analytical applications of EDTA and related compounds*. Oxford, Pergamon Press, 1972. 368 p.

Received: 24 April 2015.

УДК 551.464.679.1:552.578.2.061.3(071.16)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В ОТЛОЖЕНИЯХ ПУР-ТАЗОВСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ (СЕВЕРО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Исаева Елена Ринатовна,

аспирант, ассистент каф. геологии и разведки полезных ископаемых
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, д. 30. E-mail: elena_isayeva.89@mail.ru

Столбова Нэля Федоровна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. геологии и разведки полезных
ископаемых Института природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: elena_isayeva.89@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования проблем, связанных с неоднородностью коллекторов, непостоянством их фильтрационно-емкостных параметров, отсутствием связи между проницаемостью и открытой пористостью в зонах аккумуляции углеводородов.

Цель работы: выявить особенности распределения урана в нефтегазоносных отложениях северо-востока Западной Сибири.

Материал и методы исследования. Объектом исследований явились юрско-меловые отложения, вскрытые 7 глубокими скважинами (Ванкорская-11, Северо-Ванкорская-1, Западно-Лодочная-1, Восточно-Лодочная-1, Ичёмминская-1, Ячиндинская-1, Северо-Туколандская-1), пробуренными на территории Пур-Тазовской нефтегазоносной области (северо-восток Западной Сибири). Скважинами были вскрыты следующие свиты: танамская K_2tn , салпадаяхинская K_2sl , насоновская K_2ns , дорожковская K_2dr , долганская K_2dl ; яковлевская K_1jak , малохетская K_1mch , суходудинская K_1sd , нижнехетская K_1nch , яновстанская J_3-K_1jan , сиговская J_3sg , точинская J_2-tch , малышевская J_2ml , леонтьевская J_2ln и вымская J_2vm . Для более глубокого понимания процессов, ответственных за формирование емкостных свойств пород в зонах аккумуляции УВ, информативность геофизических методов была уточнена и дополнена с помощью геохимических, минералого-петрографических и битуминологических методов исследования. Геохимические особенности распределения урана изучались по керну и шламу (2330 образцов) представленных скважин. Кроме этого, для выявления корреляционной связи между концентрацией урана и фильтрационно-емкостными параметрами пород использовались данные лабораторных определений проницаемости и открытой пористости.

Результаты. Выявлено, что на изменение фильтрационно-емкостных свойств нефтегазоносных отложений наиболее сильное воздействие оказывают дислокационно-метасоматические процессы, приводящие к образованию неоднородных зон растворения и цементации. Показано, что прогноз зон перспективных коллекторов фактически связан с прогнозом зон интенсивного развития данных процессов. Выявление таких интервалов возможно с помощью закономерностей распределения урана. Перспективные отложения, как правило, характеризуются аномально низкими содержаниями U (менее 1,5 г/т), также наличием эпибитумоидов, признаков растворения и коррозии обломков и цемента. Проведена попытка выявления зон перспективных коллекторов в скважине Ванкорская-11 на основе выделенных геохимических особенностей поведения урана.

Ключевые слова:

Геохимия, уран, углекислотные флюиды, эпигенез, Западная Сибирь.

Для более ясного представления о генезисе продуктивных коллекторов необходимо изучить механизм аккумуляции углеводородов (УВ), а также условия формирования пустотного пространства, учитывая не только седиментационные, но и эпигенетические процессы [1–9].

В настоящее время все больше исследователей приходят к выводу, что существует связь нефтегазоносных месторождений с зонами глубинных разломов, по которым может происходить внедрение флюидов. Северная часть Западно-Сибирской плиты на современном этапе испытывает дифференцированное поднятие [10]. По данным В.А. Кренина изучаемая территория тяготеет к западному борту южной части Худосейской рифтогенной зоны, которая выделяется по гравимагнитным и сейсморазвездочным материалам как линейная надпорядковая тектоническая структура [11]. Эти данные свидетельствуют о наличии дислокационных процес-

сов (проницаемых зон) в исследуемом районе работ, а следовательно, и о возможности внедрения в юрско-меловые отложения глубинных флюидов.

Основными составляющими глубинных флюидов являются углекислый газ, метан, водород и вода. Известно, что в условиях глубин нефтегазообразования [12] вода и углекислота обладают высокой химической активностью, а следовательно, осадочные породы подвержены инфильтрации флюидов, которые находятся в агрессивном сверхкритическом состоянии, и в зависимости от их количества отложения могут быть значительно преобразованы [13].

Однако некоторые исследователи [8, 9] считают, что за многообразие вторичных минералогических изменений ответственны углекислотные флюиды, а также спирты, альдегиды, кетоны и их производные, которые образуются при окислении самих залежей УВ.

В любом случае, при интенсивном воздействии углекислотных флюидов, поступающих с глубины или же образующихся за счет залежей УВ, в осадочных отложениях формируются неоднородные зоны каолинизации, карбонатизации, слюдизации, регенерации кварца, участки растворенных и корродированных пород, т. е. образуются зоны выщелачивания и цементации, эффективные и неэффективные коллектора [6]. Таким образом, инфильтрация флюидов играет определяющую роль в формировании вторичного пустотного пространства.

Известно, что зоны развития углекислотного метасоматоза в проницаемых породах могут быть выявлены по поведению многих микро и макроэлементов, принимающих участие в этих процессах [14]. В данной работе изучение особенностей поведения урана проводилось с помощью ядерно-физического метода исследования [15–18].

Считается, что содержание урана в обломочных породах связано в основном с алюмосиликатной частью породы [15]. Под воздействием растворенной в воде углекислоты исходные алюмосиликаты разрушаются, превращаясь в глинистые минералы [6]. При этом продукты реакций в системе «вода–порода» обеднены ураном. Таким образом, зоны, подверженные интенсивному воздействию дислокационно-метасоматических процессов, фиксируются по наличию отрицательных аномалий урана [15–17].

Выполненные измерения по 7 глубоким скважинам показывают, что определяющее значение в образовании вторичных коллекторов имеет первичный литолого-минералогический состав будущей ёмкости, а также объёмы поступающей в неё CO_2 . Процессы растворения чаще всего приурочены к песчаным, реже к алевролитовым породам кварцево-полевошпатового (олигомиктового) или более сложного полимиктового состава.

Граница между фоновыми и аномальными содержаниями урана в каждой разновидности пород определялась по правилу «трех сигм» для логнормального закона распределения:

$$\bar{X} / \varepsilon^3 > X_{\text{аном.}} > \bar{X} \varepsilon^3,$$

где \bar{X} – среднее геометрическое значение фона; ε – стандартный множитель.

Правая часть уравнения определяет уровень положительных аномалий или зоны накопления урана, а левая часть – уровень отрицательных аномалий или зоны выноса.

В результате статистической обработки выявлено, что для песчаников граница между фоновыми и аномальными значениями находится в пределах $1,46 < 1,88 < 2,47$, для алевролитов – $1,73 < 2,39 < 3,05$ и для аргиллитов – $1,8 < 2,44 < 3,3$. Данные интервалы значений характеризуют неизменные породы.

Пониженные значения урана встречаются в основном в мелко-, среднезернистых разуплотнённых песчаниках (рис. 1) или в зонах вторичной каолинизации (рис. 2). Такие породы наиболее сильно подверглись дислокационно-метасоматическим процессам, что способствовало выносу урана. Осо-

бенностью таких интервалов является наличие эпидитумоидов (0,02–0,06 %), также свидетельствующих о проявлении процессов флюидомиграции. Данные породы по коллекторским свойствам относятся к классам выше III [19] и могут являться продуктивными нефтегазонасыщенными. Мощности интервалов с контрастными отрицательными аномалиями от десятков сантиметров до нескольких десятков метров.

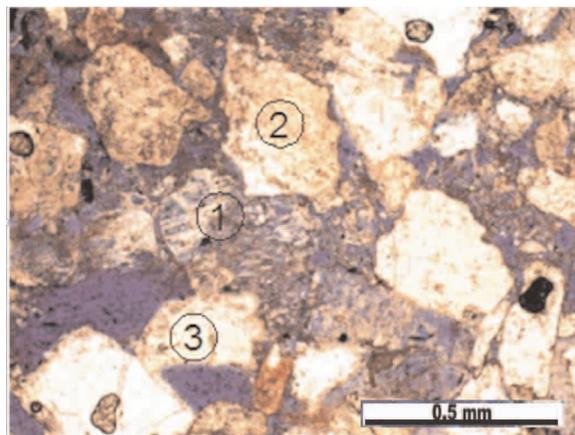


Рис. 1. Интенсивно растворенные обломки полевого шпата (1) и кварца (2, 3) в песчанике с объединенным пустотным пространством. Скв. Хикиглинская-1, яковлевская свита, гл. 2038,0 м. $U=0,71$ г/т. Никולי // Увеличение 10

Fig. 1. Fragments of feldspar (1) and quartz (2, 3) strongly dissolved in sandstone with unified voids. Khigilinskaya-1 well, yakovlevskaya suite, depth 2038,0 m. $U=0,71$ g/t. Nicols // Enlargement 10

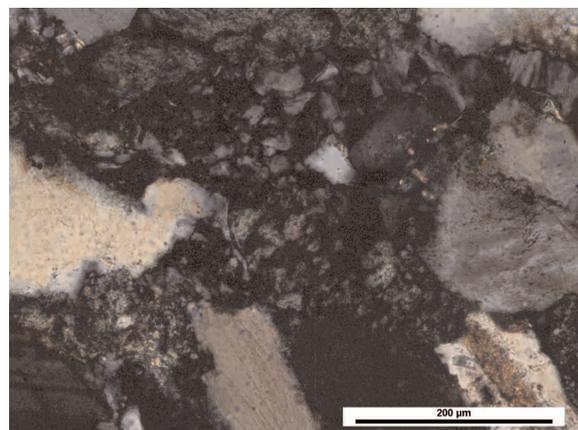


Рис. 2. Вторичная каолинизация цемента в песчанике. Скв. Западно-Лодочная-1, малохетская свита, гл. 2434 м, $U=1,57$ г/т. Никולי x. Увеличение 20

Fig. 2. Secondary kaolinization of cement in sandstone. Zapodno-Lodochnaya-1 well, malokhetskaya suite, depth 2434 m, $U=1,57$ g/t. Nicols x. Enlargement 20

Пониженные содержания урана в меньшей степени характерны и для зон карбонатизации и регенерации кварца. Что указывает на его вынос при данных процессах. Такие зоны выноса урана также могут фиксировать места проявления углекислотного метасоматоза.

При прогнозе пород-коллекторов использованы содержания урана наиболее эффективно при его значении менее 1,5 г/т.

Для выявления корреляционной связи между ураном и фильтрационно-емкостными параметрами были рассчитаны в программе STATISTICA коэффициенты ранговой корреляции Спирмена. Между ураном и коэффициентами пористости (Кпо) и проницаемости (Кпр) наблюдается обратная пропорциональная связь. При этом коэффициенты ранговой корреляции равны -0,51 и -0,52 соответственно.

В табл. 1 можно проследить, что чем меньше содержание U, тем выше фильтрационно-емкостные параметры нефтегазоносных отложений, а значит отрицательные аномалии (с концентрацией урана до 1,5–1,8 г/т) характерны для пород с повышенной пористостью и проницаемостью.

Преимущественно пониженные концентрации урана характерны для яковлевской, реже суходунинской, малохетской, долганской и нижнехетской свит. В остальных свитах исследуемых юрско-меловых отложений, а именно в танамской, салпадаяхинской, наоновской, дорожковской верхнего мела и сиговской, точинской, малышевской, леонтьевской и вымской свит средней юры отрицательные аномалии урана встречаются реже и с меньшей мощностью и интенсивностью.

Рассмотрим возможность выявления пород-коллекторов с помощью выделенных геохимических критериев на примере скважины Ванкорская-11.

Таблица 1. Зависимость содержания U от средних значений коэффициентов открытой пористости и проницаемости (скв. Западно-Лодочная-1)

Table 1. Dependence of U content on average values of open porosity and permeability ratio (Zapodno-Lodochnaya-1 well)

Уран, г/т Uranium, g/t	Количество проб Sample amount	Кпо, % Cpo, %	Кпр, мД Cpr, mD
0–1	10	17,83	32,71
1–1,5	47	15,72	25,35
1,5–2	68	11,92	17,73
2–2,5	114	5,36	6,23
2,5–3	89	4,59	5,39
3–3,5	15	2,86	2,99
Более 3/More than 3	9	0,48	0,003

По данным геофизических исследований в скважине выделяют следующие наиболее перспективные пласты: Н/Як-III-VII, Нх-I и Нх-III-IV. Перспективность этих интервалов подтверждается геохимическими данными (табл. 2).

Однако, для выделения перспективных отложений, помимо наличия пород-коллекторов (отрицательных геохимических аномалий), необходимо учитывать и наличие флюидопоров, а также генерирующий потенциал нефтематеринских толщ (яновстанской свиты).

Интервалы с концентрацией U, превышающей 3,3 г/т (достигающей 9,93 г/т в скважине Западно-Лодочная-1), т. е. характеризующиеся положительными аномалиями, соответствуют отложе-

Таблица 2. Краткая характеристика пластов-коллекторов и наиболее интенсивных геохимических аномалий по скважине Ванкорская-11

Table 2. Brief characteristic of the reservoir beds and the most intensive geochemical anomalies by the Vankorskaya-11 well

Пласт-коллектор Reservoir bed	Интервал по данным ГИС, м Interval by the data of GIS, m	Мощность, м Power, m	Интервал по данным геохимии, м Interval by the data of geochemistry, m	Уср. г/т (g/t)	Литология Lithology	Тип и содержание битумоидов Type and content of bitumoids	Интервалы и результаты испытаний Intervals and test results
Н/Як-III-VII	1663,9–1725	61,1	1660,7–1700	0,9	Песчаники аркозовые, пористые, слабосцементированные. Корродированные и катаклазированные. С реликтами каолинитового цемента Sanstones arkose, porous, poorly cemented. Coordinated and cataclastic. With relics of kaolinite cement	Эпибитумоиды (0,02–0,08 %). Состав изменяется от смолистого до легкого Epi-bitumoids (0,02–0,08 %). Composition changes from resinous to light	Инт. 1662–1668 Qг-59,1 тыс. м ³ /сут. Qн-44,8 м ³ /сут. Инт. 1684–1694 Qг-1,9 тыс. м ³ /сут. Qн-168,3 м ³ /сут.
Нх-I	2652–2667	15	2658,5–2663,5	1,62	Песчаники аркозовые с пустотами выщелачивания. Мономинеральные кальцитовые и каолиновые микропористые цементы. Обломки дробленые и трещиноватые, корродированные. Запах УВ Sanstones arkose with solution cavities. Monomineral calcite and kaolinite microporous cements. Fragments crushed and craced, coordinated. Smell of hydrocarbons	Эпибитумоиды (0,02–0,04 %). Состав от маслянисто-смолистого до маслянистого Epi-bitumoids (0,02–0,04 %). Composition is from oily-resinous to oily	Инт. 2656–2666 Qж-0,37 м ³ /сут.
Нх-III-IV	2775–2822	47	2778,0 2785–2788	1,46			Инт. 2772–2784 Qн-306 м ³ /сут. Qг-52 тыс. м ³ /сут. Qв-2,48 м ³ /сут. с пл. нефти Qв-16,34 м ³ /сут.

ниям доманикового типа [17, 20] или зонам накопления битумов на древних или современных водонефтяных контактах [9, 21]. Кроме этого, высокие значения U характерны также для пород, значительно обогащенных продуктами окисления УВ (рис. 3).

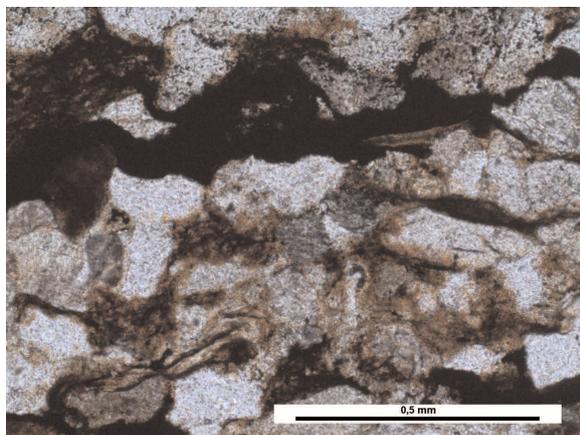


Рис. 3. Песчаник с органическим веществом. Скв. Хикиглинская-1, сиговская свита, гл. 3892 м. Содержание $U=3,47$ г/т. Николс \parallel . Увеличение 10

Fig. 3. Sandstone with organic substance. Khikiginskaya-1 well, sigovskaya suite, depth 3892 m. Content $U=3,47$ g/t. Nicols \parallel . Enlargement 10

Как показали исследования, выполненные в СНИИГиМС и ТПУ, уран накапливается керогеном типа-II (сапропелевым ОВ), который образуется при недостатке кислорода в результате органического синтеза металлоорганических геополимеров [17].

По наличию положительных аномалий, их интенсивности и мощности можно условно оценить генерационный потенциал нефтематеринских отложений (яновстанской свиты) [22].

Рассмотрим литогеохимический разрез яновстанской свиты на примере скважины Ванкорская-11 (рис. 4). На рисунке видно, что наиболее интенсивная и мощная положительная аномалия характерна для интервала 3180,0–3230,0 м. Здесь наблюдается повышенное содержание захороненного ураноносного органического вещества (доля ураноносного керогена составляет 0,828 % (гл. 3200,0 м) и 0,669 % (гл. 3205,0 м)). Для таких интервалов характерно наличие битумоидов смешанного типа или синбитумоидов, которые на рис. 4 представлены в виде черных кружочков. При мощности данных отложений, равной 50 м, можно предполагать, что количество нефтегенерирующего ОВ достаточно велико.

Выводы

В результате выполненных работ было показано, что зоны развития эффективных коллекторов,

как правило, характеризуются аномально низкими значениями урана (менее 1,5 г/т). Эта закономерность была положена в основу методики выделения пород-коллекторов в терригенных отложениях Пур-Тазовской НО по литогеохимическим данным.

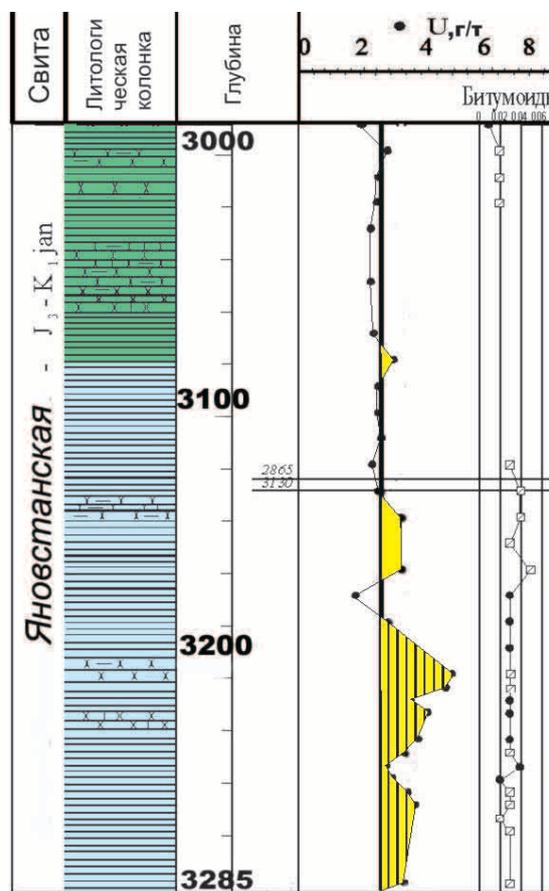


Рис. 4. Литогеохимический разрез яновстанской свиты скважины Ванкорская-11 с распределением урана и битумоидов

Fig. 4. Lithological-geochemical section of yanovstanskaya suite of Vankorskaya-11 well with uranium and bitumoid distribution

С помощью геохимических особенностей распределения урана были выделены следующие наиболее перспективные свиты: долганская K_2dl ; яковлевская K_1jak , малохетская K_1mch , суходундинская K_1sd , нижнехетская K_1nch .

Выделенные с помощью методов ГИС пласты-коллекторы скважины Ванкорская-11 также фиксируются и по геохимическим данным.

Интервалы с повышенным содержанием урана (более 3,3 г/т) соответствуют отложениям доманикового типа и могут условно служить оценкой генерационного потенциала нефтематеринских отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлин Ю.К., Конюхов А.И., Карнюшина Е.Е. Литология нефтегазоносных толщ. – М.: Недра, 1991. – 286 с.
2. О постседиментационных изменениях в породах юрско-неокомских пластов, их влияние на коллекторские свойства и нефтеотдачу / И.Ю. Вильковская, З.Я. Сердюк, Л.И. Зубарева, Н.В. Кирилова, О.Н. Стефаненко, Е.С. Бубнова // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Матер. VII Всерос. литологического совещания. – Новосибирск, 2013. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – Т. I. – С. 163–167.
3. Каналы восходящей миграции флюидов в зонах заводнения карбонатных коллекторов турнейского яруса / А.А. Ескин, В.П. Морозов, Э.А. Королёв, А.Н. Кольчугин // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Матер. VII Всерос. литологического совещания. – Новосибирск, 2013. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – Т. I. – С. 298–301.
4. Ильясова Е.Н., Сахибгареев Р.С. Влияние условий формирования нефтяных залежей на степень изменения полевых шпатов // Влияние вторичных изменений пород осадочных комплексов на их нефтегазоносность. – Л.: Изд-во ВНИГРИ, 1982. – С. 94–103.
5. Коноваленко С.И., Недоливно Н.М. Возможность использования минералогической информации для решения прикладных задач нефтяной геологии // Природокомплекс Томской области: межвузовская региональная научно-техническая программа «Природокомплекс». – Томск: Изд-во ТГУ, 1990. – С. 34–38.
6. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
7. Прошляков Б.К. Вторичные изменения терригенных пород-коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
8. Сахибгареев Р.С. Изменение коллекторов на водонефтяных контактах // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 271. – № 6. – С. 1456–1460.
9. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. – 260 с.
10. Тектоническая история Сибирской платформы в венде-фанеразое / А.Н. Никишин и др. // Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология. – 2010. – № 1. – С. 3–16.
11. Кринин В.А. Тектоника фундамента и оценка ресурсов нефти юрскомеловых отложений северо-востока Западно-Сибирской плиты в пределах Красноярского края // Горные ведомости. – 2011. – № 9 (88). – С. 16–24.
12. Лифшиц С.Х. Роль глубинных флюидов в формировании и генезисе газонефтяных залежей // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Матер. Всерос. конф. – Москва, 2008. – М.: Геос, 2008. – С. 278–281.
13. Предтеченская Е.А. Влияние CO₂-содержащих гидротермальных растворов на коллекторские свойства глубокозалегающих песчаных пород (по экспериментальным данным) // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 8. – С. 62–70.
14. Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.В. Мирошников, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
15. Столбов Ю.М., Столбова Н.Ф., Фомин Ю.А. О возможности применения методов прикладной ядерной геохимии при изучении процессов наложенного эпигенеза нефтегазоносных осадочных бассейнов // Нефтегазовые ресурсы: сб. научных трудов НТП. – М.: Изд-во ГАНГ им. И.М. Губкина, 1994. – С. 32–40.
16. Шалдыбин М.В., Столбов Ю.М., Фомин Ю.А. Литогеохимия как резерв повышения эффективности поисково-разведочных работ на нефть и газ в Томской области // Перспективы нефтегазоносности слабоизученных комплексов отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты. Палеозой. Нижняя-средняя юра: Тез. докл. науч.-практ. конф. – Томск: Томскгеолком, 1995. – С. 65–67.
17. Столбова Н.Ф., Фомин Ю.А., Столбов Ю.М. Некоторые вопросы прикладной геохимии урана нефтяных месторождений. – Томск: Томск. полит. инст., 1988. – 15 с. Деп. в ВИЭМС 17.02.88. 536-мг88. Депонир. рук. № 536-МГ ВИЭМС, 1988. – 16 с.
18. Binney S.E., Sherpelz R.J. Review of delayed fission neutron technique // Nuclear Instruments and Method. – 1978. – № 3. – P. 413–431.
19. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа нефтегазоносных провинций СССР. – М.: Недра, 1973. – 304 с.
20. Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. – Л.: Недра, 1982. – 206 с.
21. Пеньков В.Ф. Уран и углеводороды. – М.: Недра, 1989. – 144 с.
22. Столбова Н.Ф., Исаева Е.Р. Литолого-геохимические особенности отложений яновстанской свиты Ванкорской площади // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–4. – С. 826–831.

Поступила 18.05.2015 г.

UDC 551.464.679.1:552.578.2.061.3(071.16)

FEATURES OF URANIUM DISTRIBUTION IN SEDIMENTS OF PUR-TAZOVSKY OIL-AND-GAS AREA (NORTHEAST OF WESTERN SIBERIA)

Elena R. Isaeva,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: elena_isayeva.89@mail.ru

Nelya F. Stolbova,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

E-mail: elena_isayeva.89@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to solve the problems associated with the heterogeneity of the reservoir, with the impermanence of filtration-capacity parameters, with the absence of a relationship between permeability and open porosity, to identify effectively oil and gas deposits.

The main aim of the work is to allocate the features of uranium distribution in oil-and-gas deposits in northeast of Western Siberia.

The material and methods used in the study. To understand the pressing issues on the study of hydrocarbons accumulation it is necessary to clarify and supplement the information content of geophysical methods with geochemical (nuclear physics), mineralogical-petrographic and other methods of research. The authors use the laboratory data permeability and open porosity, in conjunction with geochemical indicators of the uranium distribution to identify dependencies between them. The object of the research is a Jurassic-Cretaceous sediments (2330 samples), opened by seven deep wells drilled in the North-East of the West Siberian plate, on-site Purta-zovskoy oil-and gas-bearing area.

The results. It is revealed that the change of porosity and permeability of hydrocarbon deposits are affected most of all by dislocation and metasomatic processes, which result in formation of heterogeneous zones of dissolution and cementation. The prediction of prospective collector areas is actually associated with the prediction of zones of intensive development of these processes. It is possible to identify such intervals with the help of uranium distribution regularities. The prospective deposits are characterized, as a rule, by extremely low U contents (less than 1,5 g/t), the presence of epibitumens, signs of dissolution and corrosion of rubble and cement. The authors attempted to identify the areas of prospective reservoirs in the well Vankor-11 based on uranium geochemical behavior.

Key words:

Geochemistry, uranium, carbon dioxide fluids, epigenesis, Western Siberia.

REFERENCES

1. Burlin Yu.K., Konyukhov A.I., Karnyushina E.E. *Litologiya neftegazonosnykh tolshch* [Lithology of oil-and-gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 286 p.
2. Vilkovskaya I.Yu., Serdyuk Z.Ya., Zubareva L.I., Kirilova N.V., Stefanenko O.N., Bubnova E.S. O postsedimentatsionnykh izmeneniyakh v porodakh yursko-neokomskikh plastov, ikh vliyaniye na kollektorskie svoystva i nefteotdachu [On postsedimentary changes in rocks of the Jurassic-Neocomian strata, their influence on reservoir properties and oil recovery]. *Materialy VII vserossiyskogo litologicheskogo soveschaniya «Osadochnye basseyny, sedimentatsionnyye i postsedimentatsionnyye protsessy v geologicheskoy istorii»* [Materials of VII All-Russia Conference of lithologists. Sedimentary basins, sedimentary and post-sedimentary processes in geological history]. Novosibirsk, 2013. Novosibirsk, INGG SO RAN Press, 2013. Vol. I, pp. 163–167.
3. Eskin A.A., Morozov V.P., Korolev E.A., Kolchugin A.N. Kanalny vozhodyashchey migratsii flyuidov v zonakh zavodneniya karbonatnykh kollektorov turneyskogo yarusa [The channels of upward migration of fluids in the areas of water flooding of carbonate reservoirs of tournaisian tier]. *Materialy VII vserossiyskogo litologicheskogo soveschaniya «Osadochnye basseyny, sedimentatsionnyye i postsedimentatsionnyye protsessy v geologicheskoy istorii»* [Materials of VII All-Russia Conference of lithologists. Sedimentary basins, sedimentary and post-sedimentary processes in geological history]. Novosibirsk, 2013. Novosibirsk, INGG SO RAN Press, 2013. Vol. I, pp. 298–301.
4. Ilyasova E.N., Sakhibgareev R.S. Vliyaniye usloviy formirovaniya neftyanykh zalezhey na stepen izmeneniya polevykh shpatov [Influence of conditions of oil deposits formation on the extent of feldspars alteration]. Vliyaniye vtorichnykh izmeneniy porod osadochnykh kompleksov na ikh neftegazonosnost [Influence of secondary alteration of rocks on their petroleum potential]. Leningrad, VNIIGRI Press, 1982. pp. 94–103.
5. Konovalenko S.I., Nedolivko N.M. Vozmozhnost ispolzovaniya mineralogicheskoy informatsii dlya resheniya prikladnykh zadach neftyanoy geologii [Possibility of using mineralogical information to solve the applied problems oil geology]. *Sbornik statey: Prirodokompleks Tomskoy oblasti* [A collection of articles: Natural complex of Tomsk region]. Tomsk, TGU Press, 1990. pp. 34–38.
6. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.
7. Proshlyakov B.K. *Vtorichnyye izmeneniya terrigennykh porod-kollektorov nefti i gaza* [Secondary changes of terrigenous reservoir rocks of oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 232 p.
8. Sakhibgareev P.C. Izmeneniye kollektorov na vodoneftyanykh kontaktakh [The change of oil-water contact reservoirs]. *Doklady AN SSSR*, 1983, vol. 271, no. 6, pp. 1456–1460.
9. Sakhibgareev R.S. *Vtorichnyye izmeneniya kollektorov v protsesse formirovaniya i razrusheniya neftyanykh zalezhey* [Secondary changes of collectors at formation and destruction of oil deposits]. Leningrad, Nedra Publ., 1989. 260 p.
10. Nikishin A.N. Tektonicheskaya istoriya Sibirskoy platformy v vende-fanerazoe [Tectonic history of the Siberian platform in the Vendian and the Phanerozoic]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4, Geologiya*, 2010, no. 1, pp. 3–16.
11. Krinin V.A. Tektonika fundamenta i otsenka resursov nefti yur-skomelovykh otlozheniy severo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity v predelakh Krasnoyarskogo kraya [Tectonics of the basement and evaluation of oil resources the Jurassic and Cretaceous sedi-

- ments of the North-East of the West Siberian plate within Krasnoyarsk territory]. *Gornye vedomosti*, 2011, no. 9 (88), pp. 16–24.
12. Lifshits S.Kh. Rol glubinykh flyuidov v formirovani i genezise gazoneftnykh zalezhey [The role of deep fluids in formation and genesis of petroleum deposits]. *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft, gaz i ikh paragenezy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii* [Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses. Proc. All-Russian Conf]. Moscow, 2008. Moscow, Geos Publ., 2008. pp. 278–281.
 13. Predtechenskaya E.A. Vliyaniye CO₂-soderzhashchikh gidrotermalnykh rastvorov na kolektorskie svoystva glubokozalegayushchikh peschanykh porod (po eksperimentalnym dannym) [Effect of CO₂-bearing hydrothermal solutions on reservoir properties of deep sandy rocks (on experimental data)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university*, 2002, vol. 305, Iss. 8, pp. 62–70.
 14. Voytkovich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.V., Prokhorov V.G. *Spravochnik po geohimii* [Handbook of Geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p.
 15. Stolbov Yu.M., Stolbova N.F., Fomin Yu.A. O vozmozhnosti primeneniya metodov prikladnoy yadernoy geokhimii pri izuchenii protsessov nalozhennogo epigenez naftegazonosnykh osadochnykh basseynov [The possibility of using methods of applied nuclear geochemistry when studying the imposed epigenesis of petroleum-bearing sedimentary basins]. *Neftgazovye resursy. Sbornik nauchnykh trudov* [Oil and gas resources. Scientific papers]. Moscow, Nedra Publ., 1994. pp. 32–39.
 16. Shaldybin M.V., Stolbov Yu.M., Fomin Yu.A. Litogeokhimiya kak rezerv povysheniya effektivnosti poiskovo-razvedochnykh rabot na neft i gaz v Tomskoy oblasti [Lithochemical as a reserve for increasing the efficiency of exploration for oil and gas in Tomsk region]. *Perspektivy neftegazonosnosti slaboizuchennykh kompleksov otlozheniy yugo-vostoka Zapadno-Sibirskoy plity. Paleozoy. Nizhnnyaya-srednyaya yura: Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Petroleum prospects of poorly-studied complexes deposits in the South-East of the West Siberian plate. The Paleozoic. Lower-middle Jurassic. Abstracts of scientific-practical conference]. Tomsk, 1995. Tomsk, Tomskgeolkom Publ., 1995. pp. 65–67.
 17. Stolbova N.F., Fomin Yu.A., Stolbov Yu.M. *Nekotorye voprosy prikladnoy geokhimii urana neftnykh mestorozhdeniy* [Some issues of applied uranium geochemistry of oil fields]. Tomsk, Tomsk. Polytechnic Institute, 1988. 15 p. Dep. v VIEMS 17.02.88. 536-mg88. Deponir. ruk. № 536-MG VIEMS, 1988. 16 p.
 18. Binney S.E., Sherpelz R.J. Review of delayed fission neutron technique. *Nuclear Instruments and Methods*, 1978, no. 3, pp. 413–431.
 19. Khanin A.A. *Porody-kollektory nefti i gaza neftegazonosnykh provintsiy SSSR* [Oil and gas rock-collectors of oil-and-gas bearing provinces in the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 304 p.
 20. Neruchev S.G. *Uran i zhizn v istorii Zemli* [Uranium and life in Earth's history]. Leningrad, Nedra Publ., 1982. 206 p.
 21. Penkov V.F. *Uran i uglevodorody* [Uranium and hydrocarbons]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 144 p.
 22. Stolbova N.F., Isaeva E.R. Litologo-geokhimicheskie osobennosti otlozheniy yanovstanskoy svity Vankorskoy ploshchadi [Lithological and geochemical features of yanovstanskaya suite sediments (Vankor Area)]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 11–4, pp. 826–831.

Received: 18 May 2015.

УДК: 543:546.799 + 543.056 + 543.064

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОКСАЛАТА КАЛЬЦИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

Селявский Вадим Юрьевич,

аспирант, руководитель химико-металлургической группы
опытно-технологической лаборатории ХМЗ АО «СХК»,
Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. E-mail: duncan@qwertynet.ru

Буйновский Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор каф. химии и технологии материалов
современной энергетики Северского технологического института
Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.
E-mail: ASBujnovskij@mephi.ru

Софронов Владимир Леонидович,

д-р техн. наук, профессор зав. каф. химии и технологии материалов
современной энергетики Северского технологического института
Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Россия,
636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. E-mail: VLSofronov@mephi.ru

Селявская Евгения Викторовна,

преподаватель каф. химии и технологии материалов современной
энергетики Северского технологического института Национального
исследовательского ядерного университета МИФИ, Россия, 636036,
г. Северск, пр. Коммунистический, 65. E-mail: vevgenes@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что осаждение ионов кальция в виде оксалата нашло широкое применение для его количественного определения, концентрирования и предварительного отделения трансплутониевых элементов от целого ряда элементов (Mg, Mn, Al, Cr, Fe, Ni и т. д.). Оксалат кальция как наименее растворимый из оксалатов щелочноземельных металлов может количественно очищать раствор от радионуклидов, захватывая их в осадок и оставляя сопутствующие примеси в растворе. Знание размеров получаемых кристаллов оксалата кальция в производственных условиях позволит избежать уноса осадка при фильтрации, повысить степень разделения и, тем самым, улучшить технико-экономические показатели процесса производства.

Цель работы: исследовать влияние кислотности раствора и концентрации осадителя (щавелевой кислоты) на размеры получаемых частиц оксалата кальция и подобрать тип фильтра для улавливания частиц образующегося осадка из кислых нитратных растворов, обеспечивающий максимально полное отделение раствора от осадка, избегая дополнительной фильтрации или повторной перефильтрации раствора.

Методы исследования: метод соосаждения, адсорбция, метод квартования, определение среднечислового размера частиц осадка оксалата кальция, полученного осаждением щавелевой кислотой из азотнокислых растворов солей кальция, микрорентгеноспектральный анализ, метод растровой электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа «Inspect S» с микроанализатором Edax.

Результаты. Рассмотрены механизмы роста кристаллов в зависимости от различных факторов и условий, изучены среднечисловые размеры частиц оксалата кальция, полученного осаждением щавелевой кислотой из азотнокислых растворов солей кальция. Получены фотографии осадков и выполнен дисперсионный анализ исследуемой системы распределения частиц по размерам. Установлено, что при снижении кислотности раствора от 2,0 до 0,01 моль/л среднечисловой размер образующихся частиц оксалата кальция уменьшается от 42,0–35,0 до 1,0–0,1 мкм.

Ключевые слова:

Оксалат кальция, осаждение, соосадитель, азотнокислые растворы, морфология частиц, фракционный состав.

Введение

Один из важных способов концентрирования и разделения актиноидов основан на применении осаждения, и особенно соосаждения, с использованием подходящих соосаждителей (коллекторов) [1–3].

Большое распространение соосаждители получили при проведении работ с актиноидами в радиохимических исследованиях для отделения продуктов

реакций от больших количеств материала мишени, а также в технологии разделения и выделения радионуклидов и редкоземельных элементов [1, 4–7].

Осаждение ионов кальция в виде оксалата нашло широкое применение для его количественного определения, концентрирования и предварительного отделения трансплутониевых элементов (ТПЭ) от целого ряда элементов (Mg, Mn, Al, Cr, Fe, Ni и

т. д.) [8]. Оксалат кальция, как наименее растворимый из оксалатов щелочноземельных металлов [4, 9], способен даже при большой концентрации нитратов металлов количественно очищать раствор от радионуклидов, захватывая их в осадок и оставляя сопутствующие примеси в растворе [1, 10]. Образующийся осадок оксалата кальция легко растворяется в кислоте. Это позволяет проводить процесс осаждения, многократно концентрируя ценный компонент из раствора [11]. Ион кальция не мешает проведению многих цветных реакций микрокомпонентов с органическими реактивами [12].

Форма и структура кристаллов, а также гранулометрический состав осадков определяются условиями их получения. На характер осадка может оказывать влияние присутствие в растворе даже незначительных количеств примесей, которые, адсорбируясь или на поверхности, или попадая внутрь кристалла, меняют его форму [13].

В зависимости от назначения желательно получение осадка или с крупнокристаллической, или с мелкокристаллической структурой. Любой осадок неизбежно проходит стадию коллоидной дисперсности, важно, чтобы время нахождения в дисперсном состоянии было достаточным для диффузии ионов микроэлементов к поверхности осадка [14, 15].

Известны три механизма роста кристаллов: нормальный, слоистый и слоисто-спиральный. В первом случае ионы микроэлементов присоединяются к поверхности растущего кристалла в любом месте. Это происходит при высокой температуре, в растворе же кристаллы так не растут. В остальных случаях, в том числе и в растворах, ионы микроэлементов могут присоединяться только к торцам ростовых слоев элементарной высоты, распространяющихся по гладкой, уже сформированной поверхности [13].

В этих случаях появление и рост кристаллов осуществляется в два этапа. Вначале (первый этап) образуются очень мелкие центры кристаллизации (зародыши кристаллов), а затем (второй этап) происходит образование и рост мелких кристаллов. Для дальнейшего роста и образования крупнокристаллических осадков нужно, чтобы первая стадия происходила медленно, т. к. при этом образуется меньше центров кристаллизации, но зато больше вещества адсорбируется на поверхности зародышей, образуя крупные кристаллы [16].

Известны три гидрата оксалата кальция: $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. При обычных условиях стабильная форма – моногидрат (получаются при осаждении из горячих растворов). Ди- и тригидраты, образующиеся при осаждении в холодном растворе, переходят при стоянии в моногидрат [17]. На практике оксалат кальция осаждают из кислых или щелочных растворов. Известны методы осаждения его из кислых растворов, которые затем нейтрализуют до определенного значения pH [18].

Осаждение оксалата кальция из кислых и щелочных растворов приводит к образованию осадка, который трудно отфильтровать и промыть, но такой

осадок хорошо адсорбирует примеси. В кислой среде происходит частичное растворение $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, в щелочной – соосаждение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образование CaCO_3 . Оксалат кальция осаждается количественно при pH 4,0 (практически не ниже 4,0 и не выше 6,0) [17, 19–21]. Наиболее чистые осадки оксалата кальция получают при выдерживании осадка в маточном растворе, что связано со способностью оксалата кальция выделяться из пересыщенных растворов всегда с некоторым замедлением [18].

Сведения о влиянии условий осаждения на размер кристаллов оксалата кальция в литературе практически отсутствуют, в связи с чем были проведены исследования, частично ликвидирующие этот пробел и устанавливающие закономерности формирования размера частиц осадка образующегося оксалата кальция от кислотности его нитратного раствора и избытка щавелевой кислоты.

Экспериментальная часть

Для исследований были взяты следующие реактивы: нитрат кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, «х.ч.», щавелевая кислота $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, «х.ч.», азотная кислота концентрированная HNO_3 , «х.ч.», дистиллированная вода.

Первоначально определяли среднечисловые размеры частиц осадка оксалата кальция, полученного осаждением из азотнокислых растворов солей кальция щавелевой кислотой, взятой в стехиометрическом соотношении к концентрации ионов кальция в растворе. В качестве исходного раствора использовался раствор нитрата натрия с концентрацией 1,0 моль/л (считая на ионы Ca^{2+}). В качестве осадителя использовался раствор щавелевой кислоты концентрацией 1,0 моль/л по $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$. Осадитель добавлялся в мольном соотношении 1:1, 1:1,2. Осаждение проводили при длительности 60 мин. Отфильтрованные осадки высушивали, и от них методом квартования отбиралась проба для определения среднечислового размера их частиц с помощью микрорентгеноспектрального анализа методом растровой электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа «Inspect S» с микроанализатором Edax [22].

Результаты и их обсуждение

Особенности морфологии частиц осадка оксалата кальция, полученного из азотно-кислого раствора нитрата кальция, осажденного с помощью щавелевой кислоты при мольных соотношениях ионов Ca^{2+} : $\text{C}_2\text{O}_4^{2-} = 1:1$; 1:1,2, представлены в табл. 1, 2. На основании полученных фотографий был выполнен дисперсионный анализ исследуемой системы. Результаты распределения частиц по ее размерам представлены в табл. 3.

Из представленных в табл. 1–3 данных видно, что среднечисловой размер получаемых частиц оксалата кальция зависит от кислотности раствора и от избытка осадителя. При снижении кислотности раствора от 2,0 до 0,01 моль/л среднечисловой размер образующихся частиц оксалата кальция уменьшается от 42,0–35,0 до 1,0–0,1 мкм (табл. 1).

Таблица 1. Микрофотографии осадка CaC_2O_4 в зависимости от кислотности раствора (при молярном соотношении $\text{Ca}^{2+} : \text{C}_2\text{O}_4^{2-} = 1:1$)

Table 1. Microphotographs of CaC_2O_4 sediment depending on the solution acidity (at mole ratio $\text{Ca}^{2+} : \text{C}_2\text{O}_4^{2-} = 1:1$)

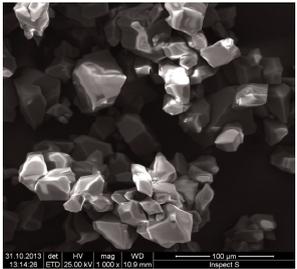
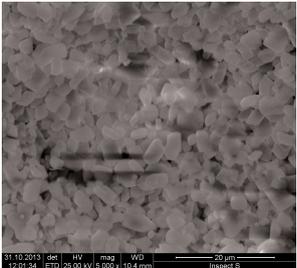
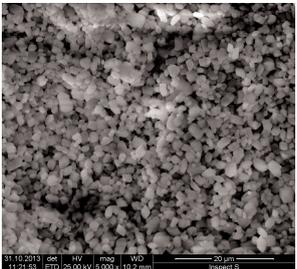
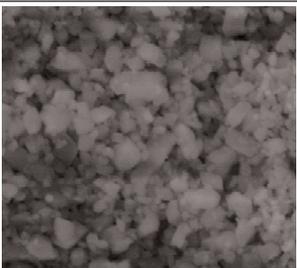
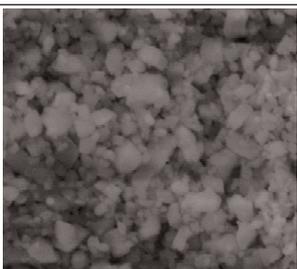
Индекс пробы Sample index	Кислотность раствора, моль/л Solution acidity, mole/l	Микроструктура частиц Particle microstructure	Среднечисловой размер частиц, мкм Average particle size, μm
1	2,0		35,0–42,0
2	1,0		5,0–8,0
3	0,5		3,0–5,0
4	0,1		2,0–3,0
5	0,01		1,0–0,1

Таблица 2. Микрофотографии осадка CaC_2O_4 в зависимости от кислотности раствора (при молярном соотношении $\text{Ca}^{2+} : \text{C}_2\text{O}_4^{2-} = 1:1,2$)

Table 2. Microphotographs of CaC_2O_4 sediment depending on the solution acidity (at mole ratio $\text{Ca}^{2+} : \text{C}_2\text{O}_4^{2-} = 1:1,2$)

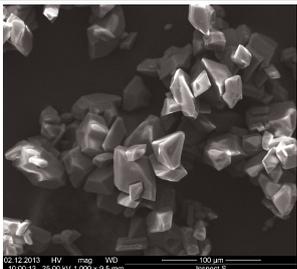
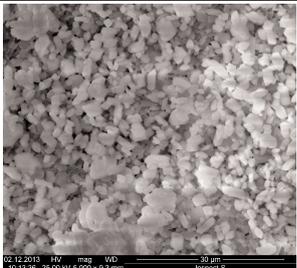
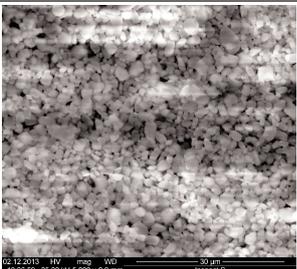
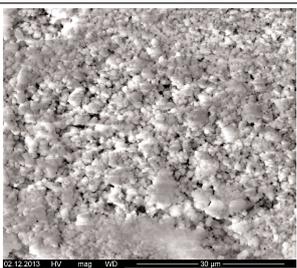
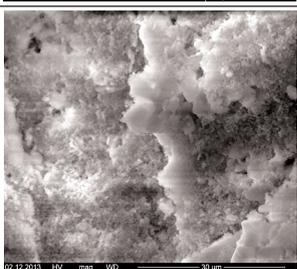
Индекс пробы Sample index	Кислотность раствора, моль/л Solution acidity, mole/l	Микроструктура частиц Particle microstructure	Среднечисловой размер частиц, мкм Average particle size, μm
6	2,0		28,0–32,0
7	1,0		3,0–5,0
8	0,5		1,0–3,0
9	0,1		1,0–0,01
10	0,01		>0,01

Таблица 3. Распределение частиц по размерам в зависимости от кислотности раствора при мольном соотношении $Ca^{2+}: C_2O_4^{2-}=1:1; 1:1,2$

Table 3. Particle size distribution depending on the solution acidity at mole ratio $Ca^{2+}: C_2O_4^{2-}=1:1; 1:1,2$

Кислотность раствора, моль/л Solution acidity, mole/l	Доля частиц, % Particle part, %								Средне-числовой размер частиц Average particle size	
	до 1,0	1,0–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	до 10	10,0–20,0	20,0–30,0	30,0–40,0		более 40,0
	мкм/μm									
Мольное соотношение (mole ratio) $Ca^{2+}: C_2O_4^{2-}=1:1$										
2,0	–	–	–	–	1,6	16,5	42,1	19,8	10,3	35,0–42,0
1,0	1,8	13,7	19,3	28,6	33,2	3,4	–	–	–	5,0–7,0
0,5	5,2	30,0	39,4	17,7	7,7	–	–	–	–	3,0–5,0
0,1	13,8	57,7	22,6	4,7	1,2	–	–	–	–	2,0–3,0
0,01	62,6	33,5	3,9	–	–	–	–	–	–	1,0–0,1
Мольное соотношение (mole ratio) $Ca^{2+}: C_2O_4^{2-}=1:1,2$										
2,0	–	–	–	–	3,8	30,7	45,9	13,7	5,9	28,0–32,0
1,0	5,4	19,8	32,4	20,3	21,4	0,7	–	–	–	3,0–5,0
0,5	11,3	43,1	31,6	9,8	4,2	–	–	–	–	1,0–3,0
0,1	31,6	62,8	4,9	0,7	–	–	–	–	–	1,0–0,01
0,01	78,8	21,2	–	–	–	–	–	–	–	менее 0,01

При изменении количества осадителя меняется фракционный состав полученного осадка оксалата кальция (табл. 3). Таким образом, можно сделать вывод, что при увеличении избытка осадителя (щавелевой кислоты) в азотнокислых растворах нитрата кальция среднечисловые размеры полученных частиц оксалата кальция уменьшаются.

Используя полученные данные о размерах кристаллов оксалата кальция, образующихся в зависимости от условий процесса (кислотности и избытка щавелевой кислоты), можно подобрать фильтр, предотвращающий унос осадка, на примере классификации обеззоленных фильтров, представленной в табл. 4.

Таким образом, для улавливания частиц образующегося осадка оксалата кальция из азотнокислых растворов при кислотности 2,0 моль/л подходит любой тип обеззоленных фильтров, представленных в табл. 4, при кислотности от 2,0 до 1,0 моль/л – все, кроме фильтров типа красная лента (табл. 4), при кислотности от 1,0 до 0,1 моль/л необходимо использовать только фильтры типа синяя или зеленая лента, иначе часть осадка будет уходить вместе с раствором, в связи с чем в технологическом цикле может потребоваться дополнительная фильтрация или повторная перефильтрация раствора.

Таблица 4. Классификация обеззоленных фильтров [23, 24]

Table 4. Classification of ashless filters [23, 24]

Тип (сорт) Type (grade)	Характеристика свойств фильтра Filter feature characteristic	Фильтрующая способность (не более) Filtration capacity (not more than)	Сопротивление про-давлению (кПа) Burst strength (kPa)	Размер пор, мкм Pore size, μm
Зеленая лента Green band	Узкие поры, плотная, низкая скорость фильтрации Small pores, dense, low filtrating rate	170 с (s)	>25	2–3
Синяя лента Blue band	Мелкопористая, очень плотная, низкая скорость фильтрации Fine-porous, very dense, low filtrating rate	100 с (s)		3–5
Белая лента White band	Средний размер пор, средняя скорость фильтрации Average pore size, average filtrating rate	45 с (s)		5–8
Красная лента Red band	Средняя плотность, быстрая скорость фильтрации Average dense, high filtrating rate	25 с (s)		8–12

Заключение

В данной работе были изучены среднечисловые размеры частиц оксалата кальция, полученного осаждением щавелевой кислотой из азотнокислых растворов солей кальция.

Методом электронной микроскопии определены среднечисловые размеры частиц этого осадка и выполнен дисперсионный анализ исследуемой системы.

Из полученных результатов следует, что при увеличении избытка осадителя (щавелевой кислоты) в азотнокислых растворах нитрата кальция размеры полученных частиц оксалата кальция уменьшаются от 42,0–35,0 до 1,0–0,1 мкм.

Знание размеров частиц, образующихся в азотнокислом растворе, позволяет подобрать тот или иной тип (сорт) фильтров. Для улавливания частиц образующегося осадка оксалата кальция из кислых нитратных растворов необходимо использовать фильтры типа синяя или зеленая лента при кислотности раствора не более 0,1 моль/л, иначе часть осадка будет уходить вместе с раствором, в связи с чем может потребоваться в технологическом цикле дополнительная фильтрация или повторная перефильтрация раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.И. Концентрирование актиноидов соосаждением с органическими соосаждителями. – М.: Атомиздат, 1968. – 232 с.
2. Kummer J.T., Youngs J.D. The surface composition of a dilute solid solution of calcium chloride in sodium chloride // *J. Phys. Chem.* – 1963. – V. 67. – P. 107–109.
3. Матюха В.А., Матюха С.В. Оксалаты редкоземельных элементов и актиноидов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИздАТ, 2008. – 607 с.
4. Быховский Д.Н., Петрова И.К. Соосаждение церия (III) и тория (IV) с оксалатом бария // *Радиохимия.* – 1968. – Т. 10. – № 5. – С. 520–527.
5. Ryan V.A., Pringle J.W. Preparation of Pure Americium. – Denver, Colo.: Dow Chemical Company, Rocky Flats Plant, 1960. – 24 p.
6. Street K.Jr., Seaborg G.T. The Separation of Americium and Curium from the Rare Earth Elements // *J. Am. Chem. Soc.* – 1950. – V. 72. – P. 2790–2792.
7. Application of Extraction Chromatography to the Recovery of Neptunium, Plutonium and Americium from an Industrial Waste / C. Madic, C. Kertesz, R. Sontag et al. // *Separ. Sci. Tehno.* – 1980. – V. 15. – № 4. – P. 745–762.
8. Пазухин Э.М., Брызгалова Р.В. Механизм осаждения плутония (IV) и европия (III) с оксалатом кальция // *Журнал общей химии.* – 1977. – Т. XLIX. – № 1. – С. 15–20.
9. Никольский Б.П., Григоров О.Н., Позин М.Е. Справочник химика. Т. 2. – М.-Л.: Госхимиздат, 1963. – 1168 с.
10. Исследование процесса очистки водно-хвостовых растворов от америция с использованием оксалата кальция / В.Ю. Селявский, В.Г. Кочетков, С.А. Житков, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 4/2. – С. 257–264.
11. Способ извлечения америция: пат. 2477758 Рос. Федерация, МПК С22В60/02, С22В3/20. Опубл. 20.03.2013; Бюл. № 8. – 6 с.
12. Миллер А.Д., Либина Р.И. Концентрирование осаждением с карбонатом кальция и определения ряда микроэлементов, природных вод, водных вытяжек и сточных вод // *Журнал прикладной химии.* – 1959. – Т. 32. – № 12. – С. 2624–2631.
13. Рашкович Л.Н., Петрова Е.В. Рост и растворение кристаллов оксалата кальция // *Химия и жизнь.* – 2006. – № 1. – С. 24–27.
14. Смирнова Е.А., Кривохатский А.С. Влияние примесей на размер и форму кристаллов оксалатов и оксидов тория и америция // *Радиохимия.* – 1990. – Т. 32. – № 3. – С. 33–36.
15. Клячко Ю.П., Кондратюк П.П. Зависимость процесса осаждения и характера осадка от порядка взаимодействия растворов // *Заводская лаборатория.* – 1947. – Т. 13. – № 8. – С. 912–916.
16. Шаскольская М.П. Кристаллы. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
17. Кольтгоф И.М., Сендел Е.Б. Количественный анализ. – М.; Л.: Госхимиздат, 1941. – 712 с.
18. Фрумкина Н.С., Кручкова Е.С., Муштакова С.П. Аналитическая химия кальция. – М.: Наука, 1974. – 252 с.
19. Горбенко Ф.П. К вопросу о микрохимическом определении кальция в природной воде // *Гидрохимические материалы.* – 1955. – Т. 23. – С. 168–182.
20. Горбенко Ф.П. К вопросу о микрохимическом определении кальция в природной воде // *Гидрохимические материалы.* – 1956. – Т. 24. – С. 36–38.
21. Никитина Л.Д. Оксалатный метод определения фосфорного ангидрида в апатитовом концентрате и апатито-нефелиновой руде // *Заводская лаборатория.* – 1956. – Т. 22. – № 2. – С. 154–157.
22. РИ-80–15–99–2011. Рабочая инструкция по эксплуатации установки с растровым электронным микроскопом. – Северск: АО «Сибирский химический комбинат», 2011. – 23 с.
23. Лабораторные обеззоленные фильтры. URL: <http://www.filtrlab.ru> (дата обращения: 20.09.2014).
24. Классификация бумажных фильтров. URL: <http://www.fptl.ru/sprav40nik/bumajhnie-filtri.html> (дата обращения: 01.05.2015).

Поступила 29.05.2015 г.

UDC 543:546.799 + 543.056 + 543.064

THE RESEARCH OF PARTICLE SIZE OF CALCIUM OXALATE OBTAINED BY PRECIPITATION FROM NITRATE SOLUTIONS

Vadim Yu. Selyavskiy,

Stock Company «Siberian Group Of Chemical Enterprises», 1, Kurchatov Street, Seversk, 636039, Russia. E-mail: duncan@qwertynet.ru

Alexander S. Buynovskiy,

Seversk Technological Institute of National Research Nuclear University MEPhI, 65, Communistic prospectus, Seversk, 636036, Russia. E-mail: ASBujnovskij@mephi.ru

Vladimir L. Sofronov,

Seversk Technological Institute of National Research Nuclear University MEPhI, 65, Communistic prospectus, Seversk, 636036, Russia. E-mail: VLSofronov@mephi.ru

Eugenia V. Selyavskaya,

Seversk Technological Institute of National Research Nuclear University MEPhI, 65, Communistic prospectus, Seversk, 636036, Russia. E-mail: vevgenes@yandex.ru

The relevance of the research is conditioned by the fact that calcium ions precipitation in the form of oxalate is widely used for its quantitative determination, concentration and preliminary separation of transplutonium elements from a range of elements (Mg, Mn, Al, Cr, Fe, Ni etc.). Calcium oxalate being the least soluble of all oxalates of alkaline-earth metals, can quantitatively purify solutions from radionuclides by entrapping them in the precipitate and leaving the concomitant impurities in the solution. Awareness of the size of calcium oxalate crystals obtained in production conditions makes it possible to avoid the sediment entrainment while filtrating. It also increases the separation degree, thereby improving cost-performance characteristics of production.

The main aim of the research is to study the effects of the solution acidity and the precipitant concentration (oxalic acid) on the size of the resulting particles of calcium oxalate, and to choose the type of filter for entrapping particulates of sediment formed from acidic nitrate solutions, that provides the most complete separation of the solution from the precipitate without using additional filtration or re-filtration of the solution.

The methods used in the research: co-precipitation method, adsorption, quartering technique, determination of the particle size of calcium oxalate precipitate, obtained by precipitation of oxalic acid calcium salts from nitrate solutions, X-ray spectrometry analysis and scanning electron microscopy technique by means of the electron microscope «Inspect S» with the microanalyser Edax.

The results. The paper considers the mechanisms of crystal growth depending on various factors and conditions. The authors have studied the size of the particles of calcium oxalate, obtained by precipitation with oxalic acid from nitrate solutions of calcium salts. The photographs of the precipitation were made; the dispersion analysis of the examined system of particle allocation according to size was carried out. It was ascertained that by reducing the acidity of the solution from 2,0 to 0,01 mol/l, the size of the resultant particles of calcium oxalate decreases from 42,0–35,0 to 1,0–0,1 μ m.

Key words:

Calcium oxalate, precipitation, co-precipitator, nitrate solutions, morphology of particles, fractional composition.

REFERENCES

- Kuznetsov V.I. *Kontsentriruvanie aktinoidov soosazhdeniem s organicheskimi soosaditelyami* [Actinium series concentration by co-precipitation with organic precipitations]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 232 p.
- Kummer J.T., Youngs J.D. The surface composition of a dilute solid solution of calcium chloride in sodium chloride. *J. Phys. Chem.*, 1963, vol. 67, pp. 107–109.
- Matyukha V.A., Matyukha S.V. *Oksalaty redkozemelnykh elementov i aktinoidov* [Oxalates of rare earth elements and actinides]. Moscow, Izdat Publ., 2008. 607 p.
- Bykhovskiy D.N., Petrova I.K. Soosazhdenie tseriya (III) i toriya (IV) s oksalatom bariya [Co-precipitation of cerium (III) and thorium (IV) with barium oxalate]. *Radiochemistry*, 1968, vol. 10, no. 5, pp. 520–527.
- Ryan V.A., Pringle J.W. *Preparation of Pure Americium*. Denver, Colo., Dow Chemical Company, Rocky Flats Plant, 1960. 24 p.
- Street K.Jr., Seaborg G.T. The Separation of Americium and Curium from the Rare Earth Elements. *J. Am. Chem. Soc.*, 1950, vol. 72, pp. 2790–2792.
- Madic C., Kertesz C., Sontag R. Application of Extraction Chromatography to the Recovery of Neptunium, Plutonium and Americium from an Industrial Waste. *Separ. Sci. Tehno.*, 1980, vol. 15, no. 4, pp. 745–762.
- Pazukhin E.M., Bryzgalova R.V. Mekhanizm osazhdeniya plutoniya (IV) i evropiya (III) s oksalatom kaltsiya [The mechanism of precipitation of plutonium (IV) and europium (III) calcium oxalate]. *Russian Journal of General Chemistry*, 1977, vol. XLIX, no. 1, pp. 15–20.
- Nikolskiy B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E. *Spravochnik khimika T. 2* [Reference book of a chemist. Vol. 2]. Moscow-Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1963. 1168 p.
- Selyavskiy V.Yu., Kochetkov V.G., Zhitkov S.A., Buynovskiy A.S., Sofronov V.L. Issledovanie protsessov oshistki vodno-khvoshtovykh rastvorov ot ameritsiya s ispolzovaniem oksalata kaltsiya [The research of purification of water-tail solutions from americium by means of calcium oxalate]. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 4/2, pp. 257–264.
- Selyavskiy V.Yu., Gerasimenko M.N., Evstafev A.A., Zhitkov S.A., Skripnikov V.V., Shimaskiy S.A. *Sposob izvlecheniya ameritsiya* [Americium extraction technique]. Patent RF, no. 2477758, 2013.
- Miller A.D., Libina R.I. Kontsentriruvanie osazhdeniem s karbonatom kaltsiya i opredeleniya ryada mikroelementov, prirodnykh vod, vodnykh vytyazhek i stochnykh vod [Concentration by precipitation with calcium carbonate, and determination of a range of trace elements in natural waters, aqueous extracts and waste water]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 1959, vol. 32, no.12, pp. 2624–2631.
- Rashkovich L.N., Petrova E.V. Rost i rastvorenie krishtallov oksalata kaltsiya [Growth and dissolution of calcium oxalate crystals]. *Khimiya i zhizn*, 2006, no. 1, pp. 24–27.
- Smirnova E.A., Krivokhatskiy A.S. Vliyanie primesey na razmer i formu krashtallov oksalotov i oksidov toriya i ameritsiya [The effect of impurities on the size and shape of crystals of oxalates and oxides of thorium and americium]. *Radiochemistry*, 1990, vol. 32, no. 3, pp. 33–36.
- Klyachko Yu.P., Kondratyuk P.P. Zavisimost protsessov osazhdeniya i kharaktera osadka ot poryadka vzaimodeystviya rastvorov [The dependence of precipitation process and the nature of a precipitate on the order of interaction of solutions]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1947, vol. 13, no. 8, pp. 912–916.
- Shaskolskaya M.P. *Kristally* [Crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 208 p.
- Koltgof I.M., Sendel E.B. *Kolichestvennyy analiz* [Quantitative analysis]. Moscow-Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1941. 712 p.
- Frumkina N.S., Kryuchkova E.S., Mushtakova S.P. *Analiticheskaya khimiya kaltsiya* [Analytical chemistry of calcium]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 252 p.
- Gorbenko F.P. K voprosu o mikrokhimicheskom opredelenii kaltsiya v prirodnoy vode [On the issue of calcium microchemical determination in natural water]. *Gidrokhimicheskie materialy*, 1955, vol. 23, pp. 168–182.
- Gorbenko F.P. K voprosu o mikrokhimicheskom opredelenii kaltsiya v prirodnoy vode [On the issue of calcium microchemical determination in natural water]. *Gidrokhimicheskie materialy*, 1956, vol. 24, pp. 36–38.
- Nikitina L.D. Oksalatnyy metod opredeleniya fosfornogo angidrida v apatitovom kontsentratsii i apatito-nefelinovoy rude [Oxalate method for phosphoric anhydride determination in apatite concentrate and apatite-nepheline ore]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1956, vol. 22, no. 2, pp. 154–157.
- RI-80–15–99–2011. *Rabochaya instruktsiya po ekspluatatsii ustanovki s rastrovym elektronnyim mikroskopom* [Operating instructions installation with the scanning electron microscope]. Seversk, Stock Company «SIBERIAN GROUP OF CHEMICAL ENTERPRISES», 2011. 23 p.
- Laboratornye obezbozennyye filtry* [Laboratory ashfree filters]. Available at: <http://www.filtrlab.ru> (accessed 20 September 2014).
- Klassifikatsiya bumazhnykh fil'trov* [Classification paper filters]. Available at: <http://www.fptl.ru/spravo4nik/bumazhnie-filtri.html> (accessed 01 May 2015).

Received: 29 May 2015.

УДК 621.311.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТА МИНИ-ТЭЦ НА БАЗЕ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вагин Геннадий Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: vagin.g.ya@mail.ru

Солнцев Евгений Борисович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: sol10001@mail.ru

Мамонов Андрей Михайлович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: mam800@mail.ru

Петров Антон Александрович,

аспирант каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: petrov85@pisem.net

На протекание переходного процесса в системе электроснабжения с мини-ТЭЦ оказывает влияние большое количество факторов. Разработка математической модели газопоршневого агрегата на базе явнупольного синхронного генератора позволит повысить точность расчетов переходных процессов и устойчивости системы, а также позволит выполнять настройку и проверку работы регуляторов напряжения и частоты вращения первичного двигателя.

Цель работы: создание модели газопоршневого агрегата на базе явнупольного синхронного генератора, позволяющей рассчитывать и анализировать процессы в электрических сетях 6–10 кВ с мини-ТЭЦ и выполнять настройку регуляторов режима работы станции.

Методы исследования: аналитические методы и вычисление состояния и параметров протекания процессов в среде имитационного моделирования Simulink, входящей в состав программного пакета Matlab.

Результаты. Разработанная модель газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ включает: 1. Систему автоматического регулирования возбуждения генератора, в общем случае позволяющую реализовать ПИД закон регулирования. 2. Первичный двигатель с регулятором частоты вращения. 3. Явнупольный синхронный генератор, модель которого учитывает насыщение машины с помощью нормальных частичных характеристик намагничивания, позволяющих правильно учесть потоки рассеяния обмотки возбуждения синхронного генератора при нагрузке. Представленная модель наиболее полно учитывает факторы, оказывающие влияние на протекание режимов работы станции, что приводит к получению более точных результатов. Использование частичных характеристик намагничивания явнупольной синхронной машины позволяет учесть изменение параметров схемы замещения генератора при отсутствии достоверных сведений о магнитных свойствах материалов, применяемых при проектировании и изготовлении машины.

Ключевые слова:

Комплексная модель мини-ТЭЦ, явнупольный синхронный генератор, газопоршневой агрегат, система возбуждения, частичные характеристики намагничивания, уравнения Парка-Горева, переходные процессы.

Активное развитие малой распределенной энергетики в масштабах страны позволит повысить эффективность использования топлива [1–3] и надежность энергоснабжения [4, 5], снизить ущербы от возможных аварий в энергосистемах и уменьшить общий объем негативного воздействия на окружающую среду [6, 7]. С другой стороны, установка станции в системе электроснабжения сопровождается необходимостью проведения тру-

доемких расчетов, необходимых для оценки ее влияния на параметры системы электроснабжения как в переходных, так и установившихся режимах.

Особенностью мини-ТЭЦ является их низкая устойчивость [4], что связано с малыми моментами инерции вращающихся масс агрегатов. Кроме того, любое короткое замыкание в системе электроснабжения с мини-ТЭЦ является близким [8] для

данного источника энергии, поэтому будет сопровождаться изменением скорости вращения ротора генератора. Ввиду значительной трудоемкости для проведения расчетов переходных и установившихся процессов необходимо применять математическое моделирование с использованием ЭВМ.

Моделирование явнополюсного генератора

Для моделирования синхронных генераторов используется система дифференциальных уравнений Парка–Горева, во взаимной системе относительных единиц имеющая вид [9, 10] (символ «*» опущен):

$$\begin{cases} u_d = -\frac{1}{\omega_n} p\psi_d - \psi_q (1+s) - R_s i_d; \\ u_q = -\frac{1}{\omega_n} p\psi_q + \psi_d (1+s) - R_s i_q; \\ u_f = \frac{1}{\omega_n} p\psi_f + R_f i_f; \\ u_{di} = \frac{1}{\omega_n} p\psi_{di} + R_{di} i_{di}, \quad i = 0..n_d; \\ u_{qi} = \frac{1}{\omega_n} p\psi_{qi} + R_{qi} i_{qi}, \quad i = 0..n_q; \\ M_o - M_y = \frac{T_J}{\omega_n} p\omega = T_J ps, \end{cases} \quad (1)$$

где n_d, n_q – количество демпферных контуров по соответствующей оси; T_J – инерционная постоянная; s – скольжение ротора генератора относительно синхронно вращающихся осей; M_τ – механический момент на валу генератора, создаваемый первичным двигателем; M_o – электромагнитный момент сопротивления на валу двигателя.

Пренебрегая влиянием насыщения на сопротивление рассеяния контуров машины [10, 11] потокосцепления генератора можно представить как:

$$\begin{cases} \psi_d = x_{\sigma d} i_d + \psi_{\delta d}; \\ \psi_q = x_{\sigma q} i_q + \psi_{\delta q}; \\ \psi_f = x_{f\sigma} i_f + \psi_{\delta f}; \\ \psi_{di} = x_{di\sigma} i_{di} + \psi_{\delta di}, \quad i = 0..n_d; \\ \psi_{qi} = x_{qi\sigma} i_{qi} + \psi_{\delta qi}, \quad i = 0..n_q. \end{cases} \quad (2)$$

где $x_{\sigma d}, x_{f\sigma}, x_{di\sigma}, x_{qi\sigma}$ – сопротивления рассеяния соответствующего контура; $\psi_{\delta d}, \psi_{\delta q}$ – результирующие потокосцепления воздушного зазора по продольной и поперечной осям:

$$\begin{cases} \psi_{\delta d} = \frac{\psi_d + \frac{\psi_f}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{\psi_{di}}{x_{di\sigma}}}{\Gamma_d}; \\ \psi_{\delta q} = \frac{\psi_q + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{\psi_{qi}}{x_{qi\sigma}}}{\Gamma_q}. \end{cases} \quad (3)$$

Проводимости машины по продольной и поперечной осям Γ_d, Γ_q можно получить из выражения:

$$\begin{cases} \Gamma_d = \frac{1}{\eta_d x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{x_{di\sigma}}; \\ \Gamma_q = \frac{1}{\eta_q x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{1}{x_{qi\sigma}}, \end{cases}$$

где η_d, η_q – эквивалентные коэффициенты, учитывающие насыщение стали явнополюсной машины вдоль соответствующих осей [12]:

$$\eta_d = \frac{\left[\frac{i_f}{1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}} + [1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}] + \xi_d \left(i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - \xi_{dq} \xi_q \frac{x_{dq}}{x_{ad}} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right]}{\left((k_2(\Phi_2) + k_r(\Phi_{rd})) \times \operatorname{tg} \alpha_0 \left[\times [1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}] \left(i_d + i_f + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) \right] \right)}; \quad (4)$$

где

$$\Phi_2 = [1+k_r(\Phi_{rd})k_{f\sigma}] \Phi_{rd} - \frac{k_{f\sigma}}{\operatorname{tg} \alpha_0} \left[\xi_d x_{ad} \left(i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - \xi_{dq} \xi_q x_{dq} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right]. \quad (5)$$

Коэффициенты $k_r=f(\Phi_{rd}), k_2=f(\Phi_2)$ и $k_{f\sigma}=f(F_{1f})$, определяющие степень насыщения отдельных элементов машины, полученные из нормальных частных характеристик намагничивания [11], представлены на рис. 1, а. Зависимости коэффициентов ξ_d, ξ_q, ξ_{dq} , учитывающих изменение сопротивлений взаимной индукции и влияние токов поперечной оси машины на ее магнитное напряжение по продольной оси, приведены на рис. 1, б.

Блок насыщения математической модели синхронного явнополюсного генератора, реализованный в соответствии с равенствами (4), (5) в операционной среде Simulink [13], приведен на рис. 2. Структурная схема модели генератора, соответствующая выражениям (1)–(3), приводится на рис. 3.

Регулирование возбуждения генератора

Синхронные генераторы, работающие в электроэнергетической системе, оборудованы устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [14], осуществляющими регулирование тока возбуждения по заранее определенному закону [15]. В структуру типового устройства АРВ генератора входят [16]:

- каналы регулирования по отклонению режимных параметров от заданных значений, влияющие на статические и динамические характеристики регулируемой системы;

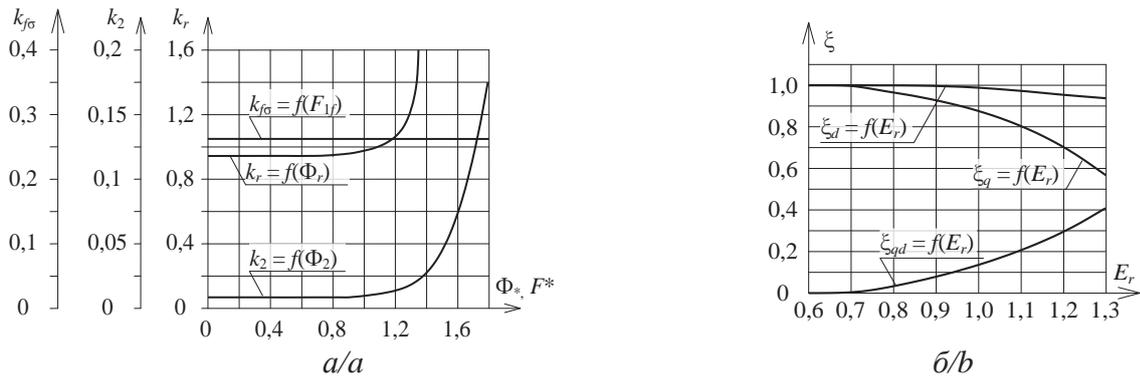


Рис. 1. Зависимости коэффициентов, учитывающих насыщение явнополюсной машины [12]: а) коэффициенты насыщения отдельных элементов генератора; б) коэффициенты изменения сопротивлений взаимоиндукции
Fig. 1. Saturation coefficients functions [12]: a) magnetic saturation coefficients of generator parts; b) mutual induction resistance coefficients

- каналы регулирования по производным режимных параметров, влияющие на динамические характеристики регулируемой системы;
- устройства форсировки, действующей при больших возмущениях в системе и предназначенной для улучшения свойства динамической устойчивости.

Наиболее распространенной системой возбуждения синхронных генераторов мини-ТЭЦ является диодная бесщеточная система. Современные регуляторы возбуждения могут работать в соответствии с ПИД-алгоритмом [17]. Структурная схема системы возбуждения генератора мини-ТЭЦ представлена на рис. 4.

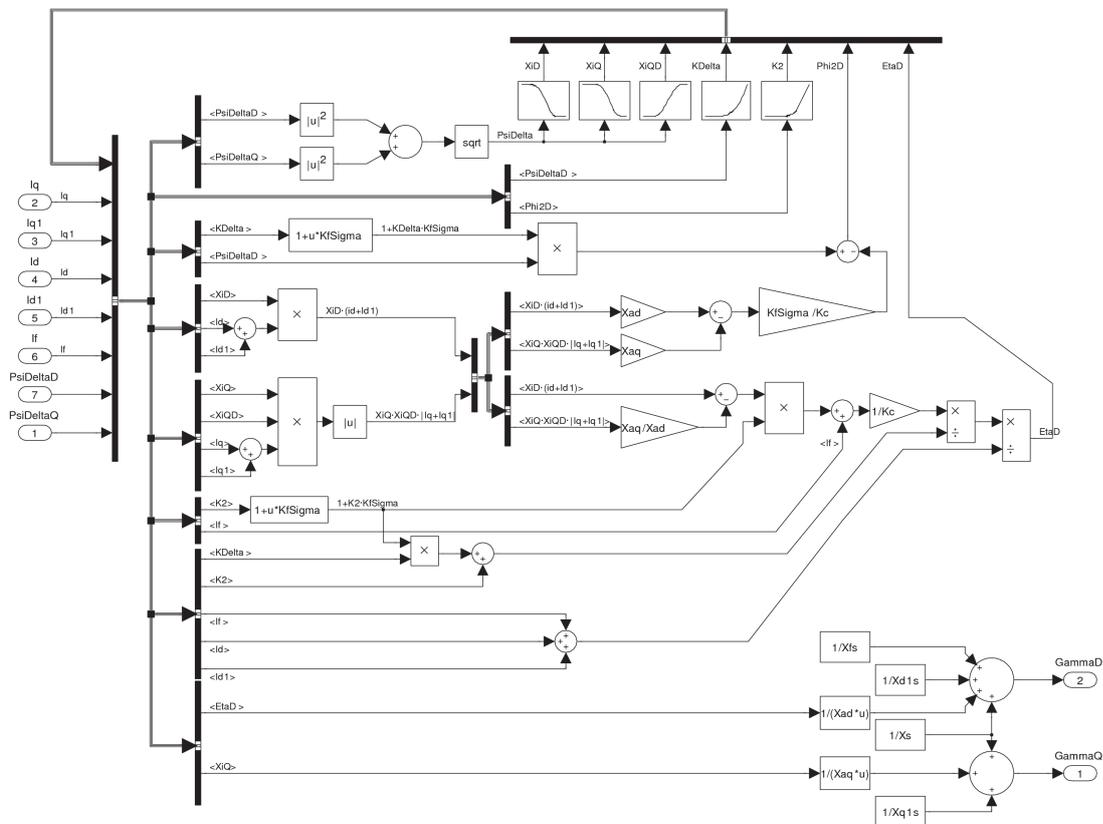


Рис. 2. Математическая модель блока насыщения SaturationBlock синхронного явнополюсного генератора
Fig. 2. Mathematical model of salient-pole synchronous generator saturation block

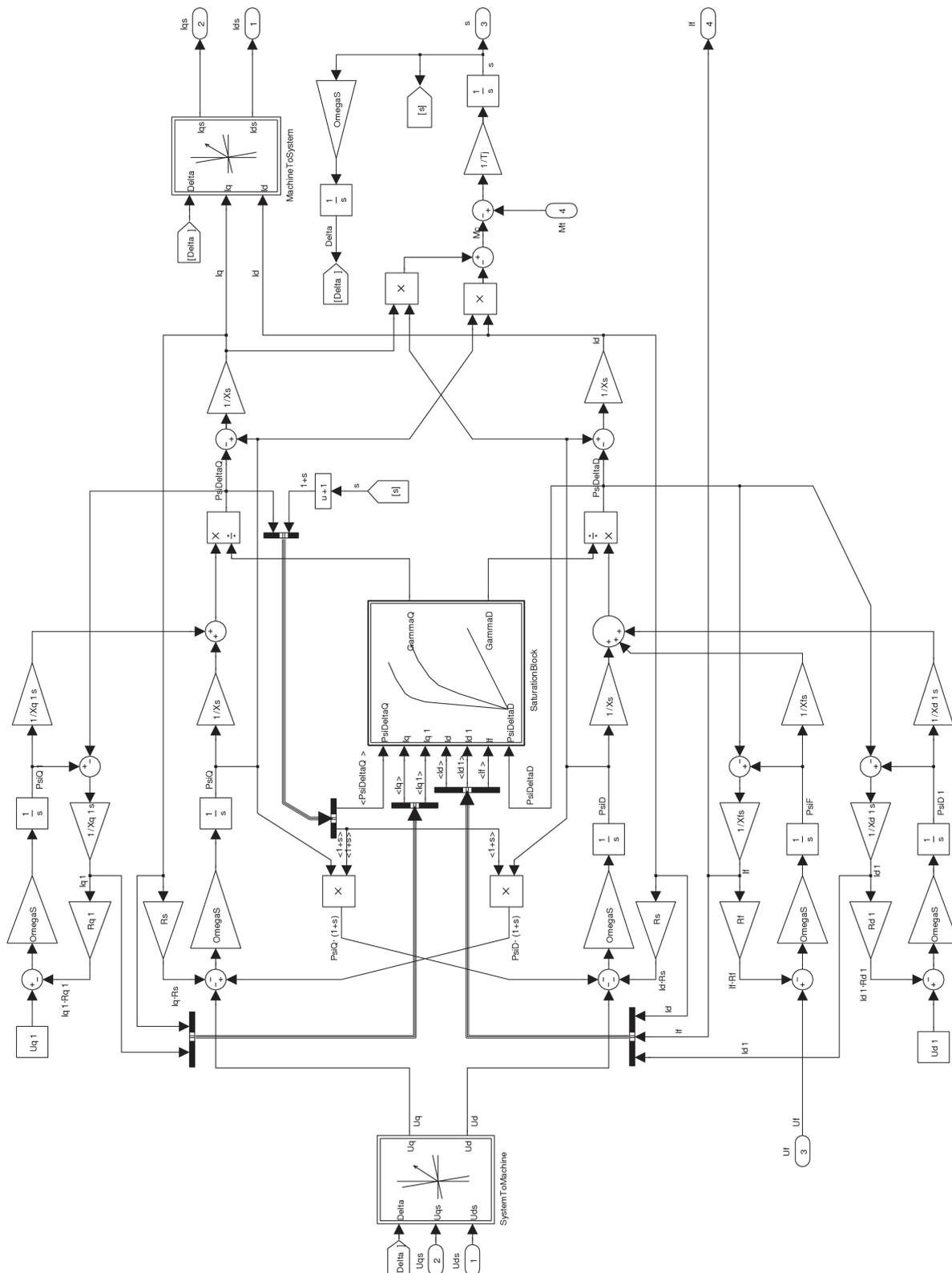


Рис. 3. Структурная схема математической модели синхронного явнополюсного генератора

Fig. 3. Structural scheme of the salient-pole synchronous generator mathematical model

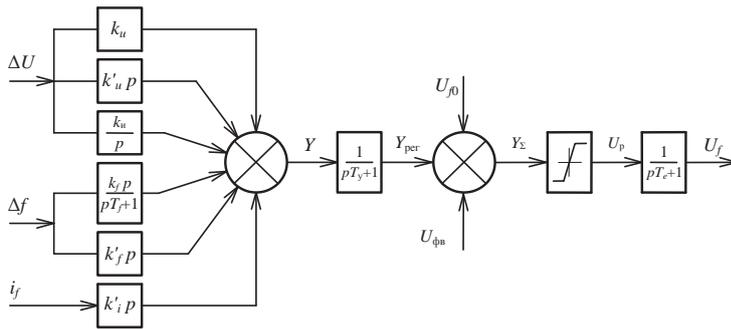


Рис. 4. Идеализированная структурная схема АРВ

Fig. 4. Structure of automatic excitation regulator

Общий сигнал с каналов регулирования определяется:

$$Y = \left(k_u + \frac{k_u}{p} + k'_u p \right) \Delta U + \left(k_f \frac{p}{Tp+1} + k'_f p \right) \Delta f + k'_i p i_f,$$

где ΔU – отклонение фактического напряжения на шинах генератора от заданного значения U_0 ; Δf – сигнал отклонения частоты напряжения генератора от номинальной; i_f – ток возбуждения синхронного генератора; $k_u, k_u, k'_u, k_f, k'_f, k'_i$ – коэффициенты усиления соответствующих каналов.

Постоянную времени запаздывания суммарного сигнала с каналов регулирования для современных устройств АРВ можно принять равной постоянной времени тиристорного моста $T_y = 0,03 \dots 0,04$ с [18]. Сигнал $Y_{\text{пер}}$ представляет величину отклонения напряжения от заданного значения, определенную в соответствии с необходимым законом регулирования. Суммарный сигнал установленного значения напряжения на зажимах генератора U_0 , отклонения $Y_{\text{пер}}$ и напряжения форсировки возбуждения $U_{\text{фв}}$ ограничивается значениями, соответствующими допустимой кратности форсировки возбуждения по напряжению.

Постоянные времени возбудителей современных диодных бесщеточных систем возбуждения составляют порядка $0,08 \dots 0,1$ с [19, 20].

Моделирование первичного двигателя

Скорость вращения ротора первичного двигателя определяется регулятором частоты вращения, подробное описание которого приводится в [21]. Структурная схема устройства представлена на рис. 5.

Сигнал на выходе измерительного преобразователя определяется по выражению [22]:

$$\eta_\omega = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(s - \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2} \right), & s > \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}; \\ 0, & |s| \leq \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}; \\ \frac{1}{\sigma} \left(s + \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2} \right), & s < -\frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}, \end{cases}$$

где σ – статизм регулирования, $\sigma = 4,5 \pm 0,5 \%$; s – скольжение ротора относительно синхронно вращающейся системы координат; $\Delta s_{\text{нч}}$ – зона нечувствительности регулятора первичного двигателя, $\Delta s_{\text{нч}} = 0,15$ Гц.

Общее выражение для сигнала на выходе элемента сравнения первичного двигателя любого типа имеет вид:

$$\eta = \eta_0 + \eta_s - \eta_\omega,$$

где η_0 – сигнал на выходе механизма управления первичного двигателя, η_s – сигнал на выходе электрогидравлического преобразователя, предназначенного для экстренного изменения мощности паровых турбин; для газопоршневого агрегата $\eta_s = 0$.

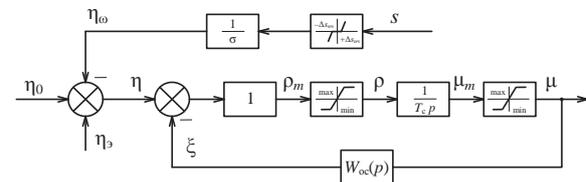


Рис. 5. Структурная схема регулятора частоты вращения

Fig. 5. Structure of speed rotate regulator

Выходной сигнал ρ усилителя пропорционален разности сигналов, поданных на вход, и при этом ограничен минимальным и максимальным значениями:

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\text{max}}, & \eta - \xi \geq \rho_{\text{max}}; \\ \eta - \xi, & \rho_{\text{min}} < \eta - \xi < \rho_{\text{max}}; \\ \rho_{\text{min}}, & \eta - \xi \leq \rho_{\text{min}}, \end{cases}$$

где ξ – корректирующий сигнал отрицательной обратной связи; ρ_{max} – максимальное значение сигнала на выходе усилителя (при необходимости увеличения скорости вращения ротора первичного двигателя) при наборе нагрузки; ρ_{min} – минимальное значение сигнала на выходе усилителя (при необходимости снижения скорости вращения ротора первичного двигателя) при сбросе нагрузки.

Положение регулирующего органа μ ограничено максимальным и минимальным значениями $\mu_{\text{min}}, \mu_{\text{max}}$ [21]:

$$\mu_{\text{min}} \leq \mu \leq \mu_{\text{max}};$$

$$\mu_{\min} = \frac{P_{\tau.\min}}{P_{\tau.\text{ном}}};$$

$$\mu_{\max} = \frac{P_{\tau.\max}}{P_{\tau.\text{ном}}},$$

где $P_{\tau.\min}$, $P_{\tau.\max}$, $P_{\tau.\text{ном}}$ – минимальная, максимальная и номинальная мощности первичного двигателя.

Скорость перемещения регулирующего органа первичного двигателя определяется как:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\rho}{T_{\text{н}}},$$

где $T_{\text{с}}$ – постоянная времени сервомотора, $T_{\text{с}} \approx 0,1 \dots 0,2$ с [9, 21],

Граничные значения ρ могут определяться:

$$\rho_{\min} = \mu_{\min} - \mu_{\max}.$$

$$\rho_{\max} = 0,3(\mu_{\max} - \mu_{\min}).$$

В зависимости от задач, предъявляемых к регулятору частоты вращения, он оснащается жесткой, издромной или комбинированной обратными связями [23].

Жесткая обратная связь применяется при необходимости создания статической характеристики регулирования синхронного генератора:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{жос}},$$

где $K_{\text{жос}}$ – коэффициент жесткой обратной связи.

Гибкая обратная связь обеспечивает создание астатической характеристики регулирования синхронного генератора:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{гос}} \frac{T_{\text{н}} p}{T_{\text{н}} p + 1},$$

где $K_{\text{гос}}$ – коэффициент гибкой обратной связи; $T_{\text{н}}$ – постоянная времени издрома [24].

Комбинированная связь представляет собой статическое звено с измененными динамическими свойствами:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{жос}} + K_{\text{гос}} \frac{T_{\text{н}} p}{T_{\text{н}} p + 1}.$$

Первичный двигатель упрощенно может быть представлен в виде аperiodического звена:

$$M_{\tau} = \frac{\mu}{T_{\text{нд}} p + 1},$$

где $T_{\text{нд}}$ – постоянная времени первичного двигателя: для газопоршневых двигателей $T_{\text{нд}} \approx 1 \dots 3,5$ с.

Моделирование переходных режимов

Моделирование переходных режимов выполнялось на примере работы газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ ДГ98М на базе синхронного явнополюсного генератора СГСБ 900К-12В2 на изменяющуюся автономную нагрузку. Параметры элементов модели приводятся в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Генератор:

- $P_{\text{ном}}=1$ МВт, $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,8$; $U_{\text{ном}}=6,3$ кВ;
- $x_{ad}=1,959$; $x_{aq}=1,113$;
- $x_{\sigma}=0,162$; $R_s=0,0115$;
- $x_{f\sigma}=0,274$; $R_f=0,002$;
- $x_{d1\sigma}=0,184$; $R_{d1}=0,054$; $x_{q1\sigma}=0,138$; $R_{q1}=0,045$.

Регулятор возбуждения:

- $I_{\text{ном}}=1,583$;
- $K_{u/\max}=2$; $K_u=15$; $K_u'=5$; $K_{int}=0$;
- $T_e=0,1$; $T_y=0,04$;

Газопоршневой агрегат и регулятор скорости вращения:

- $\sigma=4,0$ %; $\Delta s=0,15$ Гц;
- $\rho_{\min}=-1,25$; $\rho_{\max}=0,375$;
- $\mu_{\min}=0$; $\mu_{\max}=1,25$;
- $T_{\text{с}}=0,1$ с; $T_{\text{нд}}=1,25$ с.

Нагрузка моделируется изменяющимися сопротивлениями для различных интервалов времени. Для моделирования рабочих режимов сопротивления нагрузки принимают значения:

- $t=0 \dots 6$ с, $R=1,6$; $X=1,2$ (загрузка генератора 50 %, $\cos\varphi=0,8$);
- $t=6 \dots 25$ с, $R=0,8$; $X=0,6$ (загрузка генератора 100 %, $\cos\varphi=0,8$).

Ввиду громоздкости моделей элементов, приведенных на рис. 3–5, имеет смысл реализовать их в виде отдельных подсистем *Simulink* [13]. Графические изображения блоков соответствующих моделей представлены на рис. 6. Схема, в соответствии с которой производится моделирование переходных процессов, представлена на рис. 7.

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 8. Результаты испытания агрегата мини-ТЭЦ ДГ98М приведены на рис. 9.

Резкое изменение нагрузки генератора не может сопровождаться мгновенным изменением выходных параметров регуляторов газопоршневого агрегата, что объясняется наличием электромагнитной и механической инерции элементов систем управления машины. Кроме того, ввиду относительно большого значения инерционной постоянной T_j вращающихся масс машины резкое изменение нагрузки агрегата сопровождается забросом скорости вращения ротора (рис. 8, а; 9, а). Поскольку регулятор скорости вращения первичного двигателя настраивается на статический закон регулирования ($\sigma \neq 0$ [24]), установившиеся значения скорости вращения ротора машины имеют различные величины для каждого состояния нагрузки.

Изменение напряжения на протяжении нескольких периодов при набросе нагрузки (рис. 8, б) объясняется изменением размагничивающей реакции якоря и скорости вращения ротора синхронной машины, а также изменением запаса энергии магнитного поля сети за счет увеличения ее общей индуктивности. Восстановление напряжения обеспечивается работой АРВ генератора.

Анализ полученных результатов моделирования переходных процессов на ЭВМ (рис. 8) и их

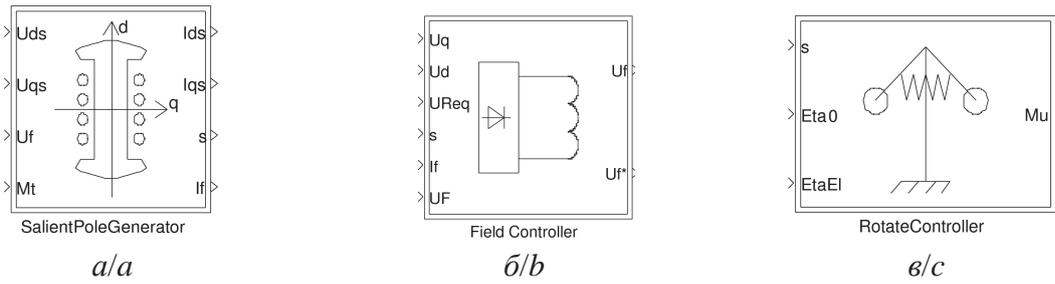


Рис. 6. Отдельные блоки модели агрегата мини-ТЭЦ: а) синхронный явнополюсный генератор; б) регулятор возбуждения генератора; в) регулятор частоты вращения

Fig. 6. Parts of mini-CHP blocks: a) synchronous salient-pole generator; b) automatic excitation regulator; c) speed rotate regulator

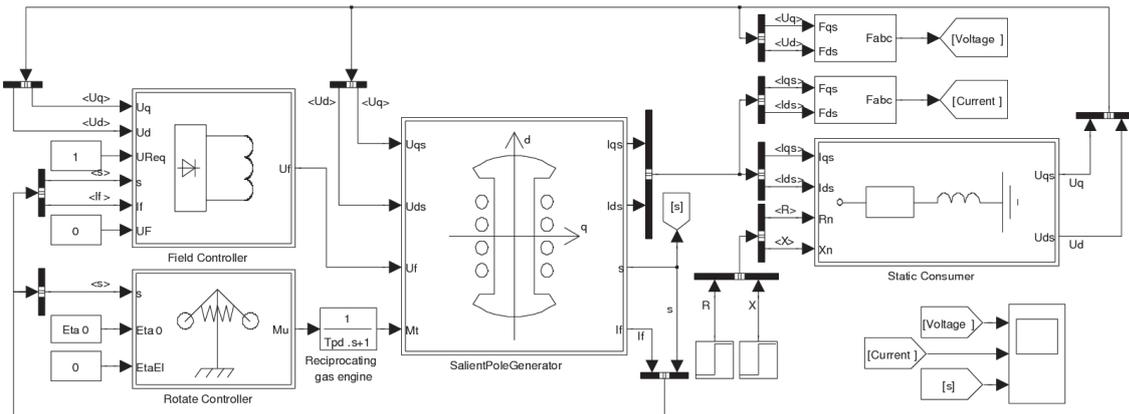


Рис. 7. Моделирование переходных процессов газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора

Fig. 7. Transient modelling of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator

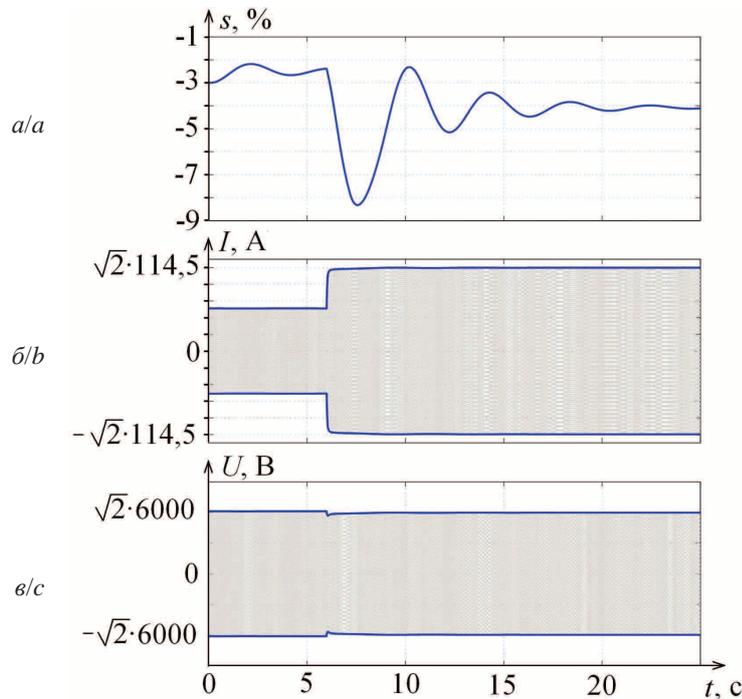


Рис. 8. Результаты моделирования переходных процессов газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора: а) скольжение ротора генератора относительно синхронной скорости вращения; б) ток нагрузки; в) изменение напряжения на зажимах генератора

Fig. 8. Transients modelling of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator: a) rotor slide; b) current; c) voltage

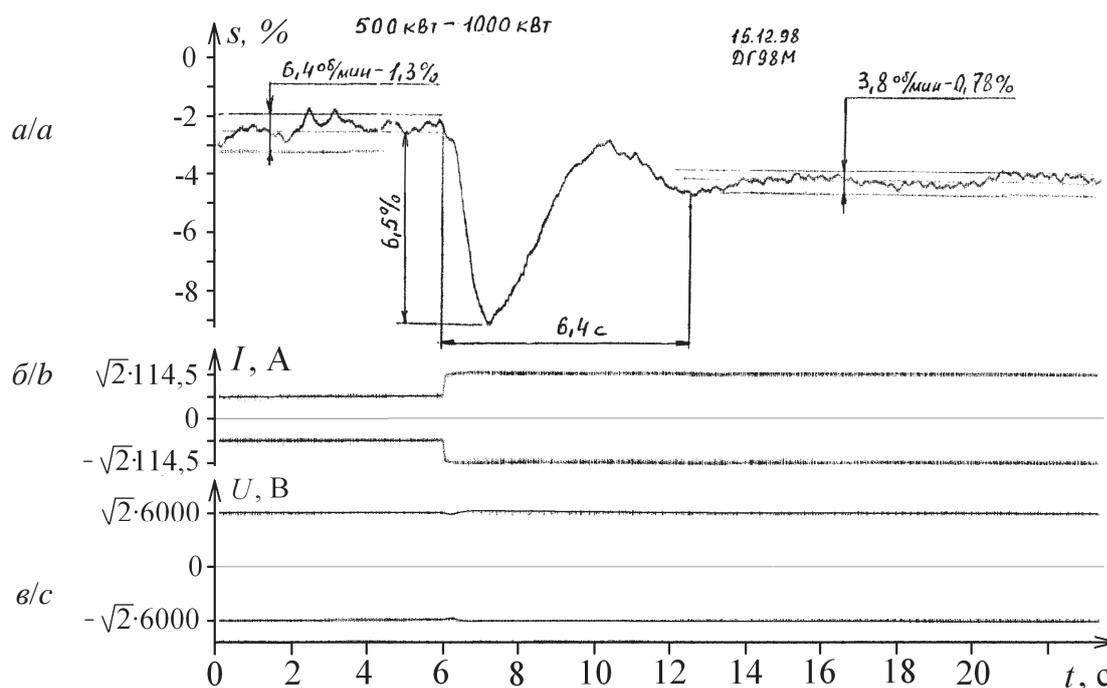


Рис. 9. Результаты испытания агрегата мини-ТЭЦ на базе газопоршневого агрегата ДГ98М: а) скольжение ротора генератора относительно синхронной скорости вращения; б) ток нагрузки; в) напряжение на зажимах генератора

Fig. 9. The test results of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator: a) rotor slide; b) current; c) voltage

сравнение с результатами экспериментов (рис. 9) подтверждает адекватность предложенной математической модели. Расхождение результатов эксперимента и математического моделирования не превышает 5 %.

Выводы

Разработана математическая модель газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе синхронного явнополюсного генератора, учитывающая действие регуляторов возбуждения и частоты вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция применения и основные технические решения типового ряда мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Е.Б. Солнцев, А.Г. Воеводин, Е.Н. Соснина, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 2–6.
2. Ackermann T., Knyazkin V. Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects // Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES. – Yokohama, 2002. – V. 2. – P. 1357–1362.
3. Faille D., Mondon C., Al-Nasrawi B. MCHP Optimization by Dynamic Programming and Mixed Integer Linear Programming // Proc. of the 14th International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. – Taiwan, 2007. – P. 572–577.
4. Арцишевский Я.Л., Земцов А.А. Как уменьшить ущербы при аварийном переходе мини-ТЭЦ в автономный режим // Релейщик. – 2014. – № 4 (20). – С. 35–39.
5. Configuration, modelling and control of a microgrid for commercial buildings application / F. Gonzalez-Espin, N. Chang, V. Valdivia-Guerrero, R. Foley // 15th European Conference on Power Electronics and Applications. – Lille, 2013. – P. 1–10.

Представленная модель может использоваться при выполнении:

- 1) расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в сетях, имеющих собственный источник электроэнергии (мини-ТЭЦ);
- 2) настройки системы возбуждения генераторов мини-ТЭЦ;
- 3) настройки системы управления первичными газопоршневыми двигателями мини-ТЭЦ;
- 4) расчета устойчивости системы с собственными источниками электроэнергии.

6. Пачурин Г.В., Маслеева О.В., Петров А.А. Экологическая оценка строительства мини-ТЭЦ в жилых районах // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 52–54.
7. Шумовое загрязнение окружающей природной среды мини-ТЭЦ / О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин, Е.Б. Солнцев, А.А. Петров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–2. – С. 291–294.
8. РД 153–34.0–20.527–98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
9. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов. изд. 2-е, перераб. и доп. / И.А. Груздев, К.П. Кадомская, Л.А. Кучумов, Я.Н. Лугинский, М.Г. Портной, Н.И. Соколов. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
10. Lipo T.A., Komatsu T., Shinohara K. Simulation of a Salient Pole Synchronous Machine with Both Field Pole and Stator Core Saturation // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. – Bodrum, 2007. – P. 331–336.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: в двух т. Т. 2. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 532 с.

12. Математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – Ч. 2. – URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_Vagin.pdf_c760cca39c.pdf (дата обращения: 31.05.2015).
13. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
14. Development of a Control Strategy for Mini CHP Plants for an Active Voltage Management in Low Voltage Networks / D.I. Hidalgo Rodriguez, L. Spitalny, J. Myrzik, M. Braun // 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. – Berlin, 2012. – P. 1–8.
15. Shaltout A.A., Abdel-Halim M.A. Damping and synchronizing torques of salient-pole generators with accurate representation of saturation // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1995 – V. 10. – № 1. – P. 1–9.
16. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 280 с.
17. Коротков В.Ф. Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах. – М.: ИД МЭИ, 2013. – 416 с.
18. Белослудцев А.М., Кавалеров Б.В. Математическое моделирование системы возбуждения и системы автоматического управления синхронного генератора для программно-моделирующего комплекса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 3. – С. 268–273.
19. Автоматика электроэнергетических систем / О.П. Алексеев, В.Е. Казанский, В.Л. Козис, Н.И. Овчаренко, В.Л. Сиротинский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 480 с.
20. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
21. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты: Монография. – С-Пб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 300 с.
22. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
23. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.
24. Автоматизация энергетических систем / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, М.М. Савин. – М.: Энергия, 1977. – 440 с.

Поступила 01.06.2015 г.

UDC 621.311.001.57

MATHEMATICAL MODEL OF MINI-CHP BASED ON SALIENT-POLE SYNCHRONOUS GENERATOR

Gennadiy Ya. Vagin,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: vagin.g.ya@mail.ru

Evgeniy B. Soltsev,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: sol10001@mail.ru

Andrey M. Mamonov,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: mam800@mail.ru

Anton A. Petrov,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: petrov85@pisem.net

Many factors affect transients in electrical systems with mini-CHP. Development of a reciprocating gas engine mathematical model based on a salient-pole synchronous generator will improve the calculations accuracy of transient and system stability. It will configure and verify the operation of voltage and rotation speed regulators of the prime engine.

The main aim of the study is to develop the reciprocating gas engine mathematical model based on salient pole synchronous generator, which allows calculating, analyzing and configuring the processes in electrical 6–10 kV system with mini-CHP.

The methods used in the study: analytical methods and calculation of transient status and parameters in the Simulink integrated to MATLAB.

The results. The reciprocating gas engine mathematical model based on a salient-pole synchronous generator includes: 1. Automatic control excitation synchronous generator. 2. Prime engine with speed control. 3. Salient-pole synchronous generator model. The saturation of the model is achieved by using the method of partial magnetic characteristics. This method allows taking into account correctly the leakage fluxes of the excitation winding of the loaded synchronous generator. The generator model uses many factors that affect the transients in the station. It leads to more accurate results. Using the method of partial magnetic characteristics allows taking into account the changes in the parameters of the generator equivalent circuit without reliable information on magnetic properties of the materials used in the machine design and production.

Key words:

Complex model of mini-CHP, salient-pole synchronous generator, reciprocating gas engine, excitation system, magnetic characteristics, Park-Gorev differential equation, transients.

REFERENCES

- Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Solntsev E.B., Voevodin A.G., Sosnina E.N., Mamonov A.M., Petrov A.A. Kontseptsiya primeneniya i osnovnye tekhnicheskie resheniya tipovogo ryada mini-TETs [Concept of application and basic technical solutions of typical mini-CHP-plants]. *Industrial power engineering*, 2010, no. 7, pp. 2–6.
- Ackermann T., Knyazkin V. Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. Yokohama, 2002. Vol. 2, pp. 1357–1362.
- Faille D., Mondon C., Al-Nasrawi B. MCHP Optimization by Dynamic Programming and Mixed Integer Linear Programming. *Proc. of the 14th International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*. Taiwan, 2007. pp. 572–577.
- Artsishevskiy Ya.L., Zemtsov A.A. Kak umenshit ushcherby pri avariynom perekhode mini-TETs v avtonomny rezhim [How to reduce losses in case of emergency transition mini-CHP to offline mode]. *Releyshchik*, 2014, no. 4 (20), pp. 35–39.
- Gonzalez-Espin F., Chang N., Valdivia-Guerrero V., Foley R. Configuration, modelling and control of a microgrid for commercial buildings application. *15th European Conference on Power Electronics and Applications*. Lille, 2013. pp. 1–10.
- Pachurin G.V., Masleeva O.V., Petrov A.A. Ekologicheskaya otsenka stroitelstva mini-TETs v zhilykh rayonakh [Ecological Estimation of Construction of Mini-Sized Heat-Electric Generating Stations in Residential Areas]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2010, no. 5, pp. 52–54.
- Masleeva O.V., Pachurin G.V., Solntsev E.B., Petrov A.A. Shumovoe zagryaznenie okruzhayushchey prirodnoy sredy mini-TETs [Noise pollution of the natural environment by mini-CHP]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 8–2, pp. 291–294.
- RD 153–34.0–20.527–98 Rukovodnyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya [Guidance on calculation of short-circuit and selection of electrical equipment]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 152 p.
- Gruzdev I.A., Kadomskaya K.P., Kuchumov L.A., Luginskiy Ya.N., Portnoy M.G., Sokolov N.I. *Primenenie analogovykh vychislitelnykh mashin v energeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh protsessov* [Application of analog computers in power systems. Methods of studying transients]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 400 p.
- Lipo T.A., Komatsu T., Shinohara K. Simulation of a Salient Pole Synchronous Machine with Both Field Pole and Stator Core Saturation. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*. Bodrum, 2007. pp. 331–336.
- Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, MEI Publ. house, 2006. Vol. 2, 532 p.
- Vagin G.Ya., Solntsev E.B., Mamonov A.M., Petrov A.A. Matematicheskaya model yavnopolynsnogo sinkhronnogo generatora mini-TETs [Mathematical model of salient pole synchronous generator of mini-CHP]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, no. 2, p. 2. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_Vagin.pdf_c760cca39c.pdf (accessed 31 May 2015).
- Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK: an environment for creating engineering applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 496 p.
- Hidalgo Rodriguez D.I., Spitalny L., Myrzik J., Braun M. Development of a Control Strategy for Mini CHP Plants for an Active Voltage Management in Low Voltage Networks. *3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*. Berlin, 2012. pp. 1–8.
- Shaltout A.A., Abdel-Halim M.A. Damping and synchronizing torques of salient-pole generators with accurate representation of saturation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 1–9.
- Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuzmenko A.A. *Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generirovaniya elektroenergii* [New technology of designing modern power generation control systems]. Moscow, MEI Publ. house, 2011. 280 p.
- Korotkov V.F. *Avtomaticheskoe regulirovanie v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Automatic control in power systems]. Moscow, MEI Publ. house, 2013. 416 p.
- Belosludtsev A.M., Kavalerov B.V. Matematicheskoe modelirovanie sistemy vzbuzhdeniya i sistemy avtomaticheskogo upravleniya sinkhronnogo generatora dlya programmno-modeliruyushchego kompleksa [Mathematical modeling of the excitation system and automatic control system of synchronous generator for software-modeling complex]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2009, no. 3, pp. 268–273.
- Alekseev O.P., Kazanskiy V.E., Kozis V.L., Ovcharenko N.I., Sirotnitskiy V.L. *Avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Automation of electric power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 480 p.
- Vaynshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem v raschetakh ustanovivshikhsya rezhimov i perekhodnykh protsessov* [Mathematical models of elements of electric power systems in calculation of the steady states and transients]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 115 p.
- Merkuryev G.V., Shargin Yu.M. *Ustoychivost energosistem. Raschety: monografiya* [Power systems stability]. St-Petersburg, Tsentr podgotovki kadrov energetiki, 2006. 300 p.
- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivovariyной avtomatiki v energosistemakh* [Calculations of stability and emergency control in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
- Vaynshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Osnovny upravleniya rezhimami energosistem po chastote i aktivnoy moshchnosti, po napryazheniyu i reaktivnoy moshchnosti* [Basic control modes of the power system frequency and active power, voltage and reactive power]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 96 p.
- Drozdov A.D., Zasyupkin A.S., Alliluev A.A., Savin M.M. *Avtomatizatsiya energeticheskikh sistem* [Energy system automation]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 440 p.

Received: 01 June 2015.

УДК 532.62:532.59

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ СТЕКАНИИ РИВУЛЕТОВ ПО НИЖНЕЙ СТОРОНЕ НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНЫ

Дехтярь Руслан Анатольевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории процессов переноса
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: dekhlyar@itp.nsc.ru

Накоряков Владимир Елиферьевич,

академик РАН, Советник РАН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.
E-mail: nakve@itp.nsc.ru

Овчинников Валерий Викторович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории процессов переноса
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: avks@itp.nsc.ru

Слесарева Екатерина Юрьевна,

инженер лаборатории процессов переноса Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: styuardessa@yandex.ru

Актуальность обусловлена использованием течения пленок жидкости в теплообменниках различного оборудования (парогенераторы угольных электростанций, компрессоры бурильных установок, абсорберы, дистилляционные колонны, тепловые насосы и др.). Наряду с поисками и освоением традиционных источников (газ, нефть) перспективным направлением является использование энергии, накапливаемой в водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др.) и ее преобразование в тепло с помощью тепловых насосов. В настоящее время тепловые насосы являются энергетически эффективным отопительным оборудованием.

Цель работы: обоснование выбора расчетных моделей и программ для распределительных устройств подачи раствора абсорбента на основании экспериментальных данных по течению ривулетов на гидрофобной поверхности при различной ориентации нормали пластины по отношению к вектору силы тяжести; определение условий, при которых происходит изменение формы ривулета, изменение направления движения жидкости; тестирование распределительных устройств, обеспечивающих стабилизацию течения для нестационарно меандрирующего ривулета.

Методы исследования: метод визуализации режимов течения с помощью скоростной видеосъемки течения ривулетов по наклонной поверхности. Используя методы цифровой обработки видео материалов, определяются параметры движения (размеры, скорость, ускорение) различных видов возмущений вдоль ривулета.

Результаты. Получены экспериментальные данные режимов течения ривулетов по нижней стороне наклонной пластины. Определены факторы, приводящие к меандрированию ривулета. Полученные данные позволяют проводить тестирование вычислительных программ на предмет адекватности результатов расчетов. Опробована схема стабилизации течения жидкости в режиме меандрирующего ривулета с использованием малорасходного капельного устройства.

Ключевые слова:

Режимы течения, меандрирование, ривулет, капли, гидрофобная поверхность.

Введение

Использование пленок жидкости в разных отраслях промышленности, в абсорберах, конденсаторах, теплообменниках делает актуальными исследования пленочных течений для проектирования парогенераторов угольных электростанций, компрессоров бурильных установок, дистилляционных колонн, тепловых насосов и т. д. [1–5]. Наряду с поисками и освоением традиционных источников (газ, нефть) перспективным направлением является использование энергии, накапливаемой в водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др.) и ее преобразование в тепло с помощью тепло-

вых насосов [6, 7]. Поиски альтернативных источников энергии привели к изобретению устройств (тепловые насосы), которые способны аккумулировать тепло, находящееся в окружающей среде (водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др. – все, что в той или иной степени может удовлетворить потребности в нагреве теплоносителя для системы отопления и ГВС)).

Структура течения пленки влияет на локальные и средние характеристики теплопереноса. Характер течения определяется свойствами жидкости, удельным расходом, свойствами подложки, касательным напряжением на межфазной

поверхности, наличием линии трехфазного контакта «жидкость – твердое тело – газ». При разрушении сплошного пленочного течения образуются ривулеты. Ривулет – отдельная струйка жидкости, ограниченная двумя контактными линиями [8–10]. При малых расходах наблюдается распад ривулета на капли. Ривулет является наиболее вероятным видом течения при стекании жидкости по плохо или неоднородно смачиваемой поверхности [11].

Ривулет движется непредсказуемым способом в виде змейки, поэтому невозможно получить однозначно траекторию движения [8]. Для течения ривулетов определены следующие характерные режимы: капельный, стационарно меандрирующий и нестационарно меандрирующий [9], и справедливы те же законы движения, что и для струйных течений. Для широкого диапазона чисел Рейнольдса, ривулетным течениям присущи такие же, как и для струй, виды возмущений: синусоидальное и «варикозное» [12].

Для течения ривулетов имеется большое количество экспериментальных данных и теоретических исследований [13–20]. В основном они получены для верхней стороны пластины (положительный угол наклона) или вертикальных поверхностей, которые могут быть как изотермические, так и неизотермические [13, 14]. Для переходных режимов течения ривулетов на нижней стороне наклонной пластины количество данных ограничено. Так, в работе [20] представлены результаты экспериментального исследования регулярных волновых режимов на нижней стороне наклонного цилиндра. Отмечено, что на поверхности ривулетов развиваются естественные волны в отличие от течения ривулета по вертикальной поверхности.

Для обеспечения надежности работы теплообменных устройств необходимы адекватные модели движения ривулетов по теплообменной поверхности различной формы, в том числе для переходных режимов течения при смене тепловых нагрузок. Для практики очень важно уметь управлять поведением ривулета. Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования особенностей движения ривулетов на нижней стороне наклонной гидрофобной поверхности, изучение особенностей движения жидкости в ривулете при смене режима течения.

Методика эксперимента

На рис. 1 показана принципиальная схема экспериментальной установки. Гладкая полиэтиленовая пластина – 1 имела длину 1400 мм и ширину 300 мм. Сосуд Мариотта – 2 позволял поддерживать постоянный расход жидкости на выходе распределительного устройства. Расход регулировался при помощи вентилей – 3. Распределительное устройство состояло из двух полиэтиленовых подающих трубок – 4 с внутренним диаметром 0,8 мм. Трубки располагались перпендикулярно поверхности пластины – 1 на расстоянии 10 мм

друг от друга по центру пластины. Зазор между поверхностью пластины и срезом подающих трубок не превышал 0,5 мм. Расход жидкости измерялся объемным способом. Для этого цифровым фотоаппаратом 5 проводилась видеосъемка процесса заполнения калиброванного сосуда 6 (40 мл) со скоростью 60 кадров в секунду. Угол наклона поверхности пластины θ составлял относительно вертикали 14° . С помощью цифровых видеокамер – 7 проводилась в разных по высоте сечениях фото-видеосъемка картин течения на нижней стороне пластины. Видеосъемка проводилась со скоростью до 1200 кадров в секунду. Координата Y вдоль пластины отсчитывалась от нижней кромки пластины.

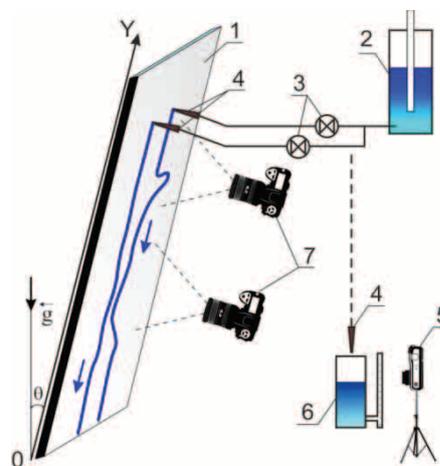


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гладкая пластина, 2 – сосуда Мариотта, 3 – вентиль, 4 – подающая трубка, 5 – цифровой фотоаппарат, 6 – калиброванный сосуд, 7 – скоростная цифровая видеокамера

Fig. 1. Diagram of the experimental unit: 1 – flat plate, 2 – Mariotte vessel, 3 – valve, 4 – feed tube, 5 – digital camera, 6 – rated vessel, 7 – speed digital video camera

Исследовалось стекание ривулета по нижней стороне пластины под действием силы тяжести, а также взаимодействие двух рядом стекающих ривулетов. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расход жидкости изменялся от $0,01$ до $1,0$ мл·с⁻¹ и поддерживался постоянным в каждом эксперименте. Постоянство расхода контролировалось до и после проведения эксперимента. При этом точность измерения расхода составляла $0,002$ мл·с⁻¹. Масса капель на поверхности определялась весовым методом. Гигроскопической ваткой на поверхности собирались несколько капель примерно одного размера. После взвешивания определялась разность веса сухой и влажной ватки, что позволяло определить среднюю массу капель.

В ходе эксперимента производилась фото-видеосъемка картин течения с помощью цифровых видеокамер – 7. Видеосъемка производилась со скоростью: 60, 300, 600 и 1200 кадров в секунду при разрешении кадра 1920×1080 , 512×384 ,

432×192, 336×96, соответственно. Значения скорости видеосъемки определялись при съемке экрана электронного секундомера с точностью до 0,1 кадра в секунду. В результате обработки видеоматериалов определены скорости и ускорения движения отдельных структур, которые можно выделить визуально на ривулете. Для определения амплитудно-частотных характеристик использовался метод быстрого Фурье преобразования. При анализе использовались массивы из 4096 точек. Безразмерная амплитуда пульсаций нормировалась по условию, что сумма всех амплитуд равна 100.

Результаты и обсуждения

При течении жидкости по нижней стороне гладкой гидрофобной наклонной пластины в зависимости от расхода на выходе из подающей трубки, так же как и в работе [9], наблюдаются следующие режимы течения потока: капельный, стационарно меандрирующий и нестационарно меандрирующий. Дополнительно к указанным режимам можно выделить режим прямооточного ривулетного течения. На нижней стороне наклонной пластины карта режимов течения ривулета отличается от карты режимов на верхней стороне, представленной в работе [9]. Для течения ривулета на нижней стороне пластины увеличивается амплитуда гистерезиса по величине расхода: при одном расходе могут существовать два режима течения. При некоторых расходах можно выделить три режима течения в зависимости от уровня малых фоновых возмущений на выходе подающей трубки. В капельном режиме частота формирования капель меньше 5 Гц. Объем капель перед отрывом достигает 0,05 мл. При расходах, соответствующих капельному или стационарно меандрирующему режиму течения, выделяются:

- капельно-ривулетный, когда на начальном участке – капельный режим, а ниже по течению – непрерывный поток жидкости. Изменение частоты отрыва капель или их размеров приводит к смене режима на капельный или ривулетный. На гидрофильной подложке капельно-ривулетная структура не наблюдалась.
- ривулетно-капельный, когда на начальном участке после выхода из подающей трубки формируется стационарный меандрирующий поток, а ниже по течению – капельный режим. При увеличении расхода около подающей трубки вместо капель формируется пленка жидкости в виде окружности (эллипса) с кольцеобразным валиком (утолщением) по периметру. На нижнем краю кольца образуется область слива и начинается ривулет с винтообразной формой поверхности.
- режим течения при расходах, соответствующих капельному режиму, когда, начиная с участка около подающей трубки, на подложке формируется узкая сплошная смоченная полоса, по которой скатываются небольшие капли.

В этом режиме на выходе из подающей трубки с большой частотой формируются мелкие возмущения каплеобразной формы (варикозное возмущение). Смоченная полоса образуется в нестационарном режиме в момент подачи жидкости, как объединение протяженных следов от капель. След представляет собой практически неподвижную пленку жидкости малой толщины. В этом режиме «капли» могут догонять ниже скатывающиеся «капли», а те, в свою очередь, могут догонять обогнавшие их «капли», поэтому в нижней зоне подложки наблюдается усиление амплитуды колебаний. На невозмущенных участках «капля» движется с ускорением от 8 до 9,6 м·с⁻². Капли, двигающиеся с ускорением, оказывают стабилизирующее влияние на поперечные (по оси X) искривления смоченной полосы.

Варикозные возмущения двигаются с ускорением на начальном этапе их существования. Затем из-за трения происходит стабилизация скорости движения «варикоза» и уменьшение их объема. Так как скорость движения центра варикозного возмущения может отличаться от скорости потока жидкости в ривулете, то при изменении размеров области, занятой варикозным возмущением, возможно изменение расхода жидкости в ривулете ниже по течению от зоны варикозного возмущения. При увеличении области возмущения увеличивается масса жидкости в зоне варикозного возмущения и соответственно расход в ривулете уменьшается, а при уменьшении «варикоза» расход увеличивается.

При течении ривулета на нижней стороне пластины режим нестационарного меандрирования может существовать при расходах ниже, чем стационарно меандрирующий. При этом наблюдается разрыв течения в точке изменения направления течения. На рис. 2 показаны отдельные кадры видеосъемки (1200 кадров в секунду) такого режима. На кадрах видно, как происходит изменение кривизны ручейка вдоль течения из-за взаимодействия возмущений (варикозное возмущение) с ниже текущим основным течением. На рисунке также отмечены основные особенности (A, B, C и a), для которых на рис. 3 приведены зависимости изменения положения этих особых точек от времени.

Одной из причин изменения формы ривулета в этом случае является тот факт, что расход жидкости по длине ривулета непостоянен, а вариации расхода соизмеримы с величиной расхода из подающей трубки. Тогда как обычно в моделях предполагается постоянный расход по всей длине течения ривулета и на радиус кривизны влияют силы поверхностного натяжения. Например, в [18] меандрирование описывается как режим синусоидальной неустойчивости, а нестационарно меандрирующий – как режим с нарастающей амплитудой. То есть для моделирования течения в ривулете нужно понимание того, как происходит движение таких возмущений вдоль потока. Напри-

мер, когда жидкость накапливается на нижней границе ривулета, то расход ниже ривулета равен нулю. А когда начинается движение нижней границы ривулета, то расход жидкости в некоторых сечениях может превышать расход на входе из подающей трубки. Таким образом, форма сечения по длине ривулета сложным образом зависит от расхода на выходе из подающей трубки. Скорость движения варикозных возмущений вдоль вертикали порядка $0,4-0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а вдоль горизонтали – до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (рис. 3). Также можно проследить, как нарастает «синусоида», из которой потом возникает «капля». При определенных условиях на струе образуется каплеобразная структура, на которой формируется точка разрыва. При небольших размерах такой капли она работает как точка изменения кривизны струи: у одной части потока около этой точки кривизна увеличивается, а у другой уменьшается.

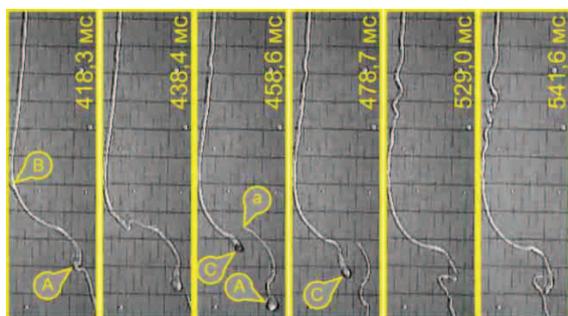


Рис. 2. Кадры видеосъемки течения ривулета. Влияние возмущений на форму ривулета $q_0=0,5 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. Участок 1,22–1,11 м. На кадрах указано время от момента подачи жидкости в подающую трубку. А, В, С и а – геометрические особенности ривулета

Fig. 2. Video frames of rivulet flow. Effect of perturbation on rivulet form is $q_0=0,5 \text{ ml}\cdot\text{с}^{-1}$. Section is 1,22–1,11 m. The frames shows the time from the moment of liquid supply into the feed tube. A, B, C and a are the rivulet geometrical features

Для случая течения на нижней стороне наклонной пластины имеется другой возможный механизм, приводящий к нестационарному меандрированию. «Варикозы» создают силу, направленную от стенки к свободной поверхности, поскольку поперечная неустойчивость контактной линии приводит к формированию вниз по потоку ривулетного течения и, соответственно, меняет режим течения жидкости в целом. Это способствует оттоку жидкости от стенки и может приводить к осушению ривулета. Изменение направления течения ривулета затем происходит по капельно-ривулетному режиму. По мере роста концевой «капли» на поверхности капли образуются «языки» от волн возмущения на ривулете. Направление движения определяется случайным образом в зависимости от того, какой из «языков» станет началом непрерывного ривулета (рис. 2).

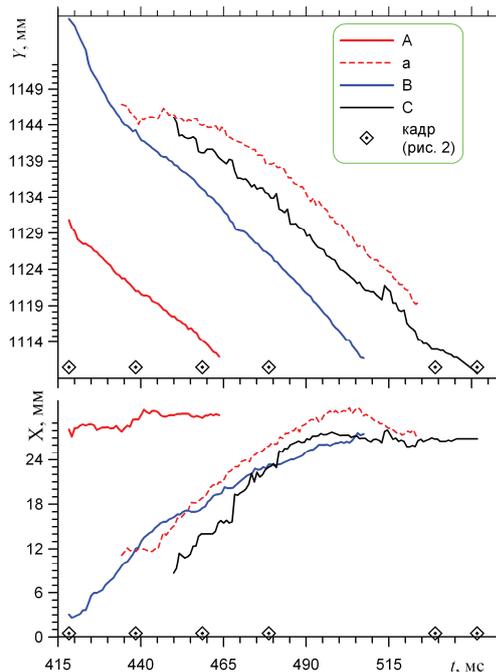


Рис. 3. Изменение положения наблюдаемых особенностей А, В, С и а (рис. 2) для координат Y, X от времени t

Fig. 3. Change in position of the observed features A, B, C and a (fig. 2) for the coordinates Y, X on time t

Характерный размер и масса «варикозы» соизмеримы с размерами и массой капель на поверхности, остающихся там при движении и меандрировании ривулета. Масса крупных капель m – порядка 3–4 мг. Мелких – порядка 1 мг (на верхней стороне пластины эта величина порядка 20–50 мг). Значение малого расхода соответственно можно оценить как $q \approx m/\rho \cdot f$, где ρ – плотность жидкости, f – характерная частота образования «варикозов», f не выше 5 Гц (частота образования концевых капель) и тогда имеем $q \approx 5-20 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. В этом случае пульсации расхода соизмеримы с начальным расходом и возможен разрыв ривулета. При более высоких расходах разрыв не происходит, но изменение направления течения происходит по «варикозному» механизму.

В эксперименте наблюдался другой вариант перераспределения потоков. Например, сильные возмущения, возникающие вверх по потоку и приходящие в точку раздвоения, вызывают перераспределение потока в пользу рукава с меньшим расходом и формируют новый рукав. А также возможно формирование точки раздвоения на нижней границе нового рукава ривулета конечной длины. В режиме нестационарного меандрирования на ривулете существуют одна или более точек раздвоения. Замечено, что точки раздвоения, как правило, образуются из каплеобразных структур, которые представляют собой участки, где наблюдается увеличение высоты профиля и расширение ривулета. Каждая из каплеобразных структур по длине ривулета имеет свою независимую фазу роста. В ко-

начной фазе роста происходит срыв каплеобразной структуры и ее ускоренное движение вниз по потоку в виде скользящей капли. Когда каплеобразных структур мало, тогда почти все капли находятся в начальной фазе роста. В этом случае скользящая капля может поглощать другие капли, и после ее прохождения не остается каплеобразных структур по длине ривулета. Если каплеобразных структур много, то на ривулете может быть несколько капель в последней фазе роста. Каплеобразная структура, которая находится в последней фазе роста, в результате взаимодействия со скользящей каплей может стать точкой раздвоения или точкой изменения направления движения ривулета.

Таким образом, стационарно меандрический или нестационарный меандрический режим течения зависит от числа каплеобразных структур по длине ривулета, и с превышением критического числа этих структур режим течения ривулета пе-

реходит из стационарного в нестационарно меандрирующий.

Существует переходная область расходов, в которой режим стационарно или нестационарно меандрирующий определяется длиной ривулета, так как число каплеобразных структур пропорционально длине ривулета. Для такого расхода жидкости существует определенная длина участка, на котором ривулет остается стационарно меандрирующим.

Для проверки гипотезы о роли неравномерности расхода жидкости вдоль ривулета на процесс меандрирования, проведены качественные опыты. Цель опытов – воздействие на варикозное возмущение таким образом, что бы компенсировать уменьшение расхода в точке изменения направления течения и вызвать «срыв» пальцеобразных структур раньше, чем начнется нарастающий рост одного из «пальцев». Для этого было организовано взаимодействие

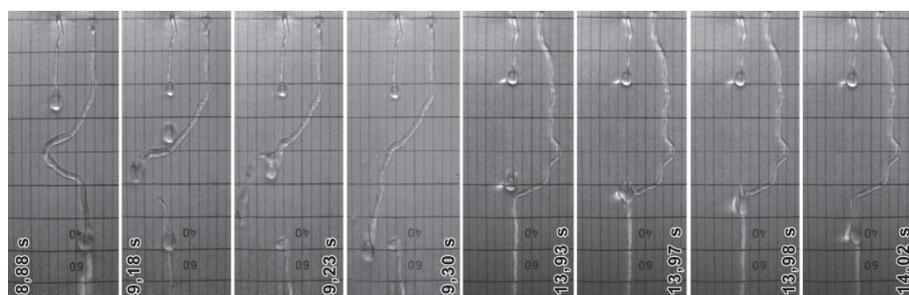


Рис. 4. Кадры видеосъемки формирования взаимодействия двух ривулетов. Расход $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (слева), $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (справа). На кадрах указано время от момента подачи жидкости в подающие трубки

Fig. 4. Video frames of two rivulets interaction formation. Consumption $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (left), $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (right). The frames show the time from the moment of liquid supply into the feed tubes

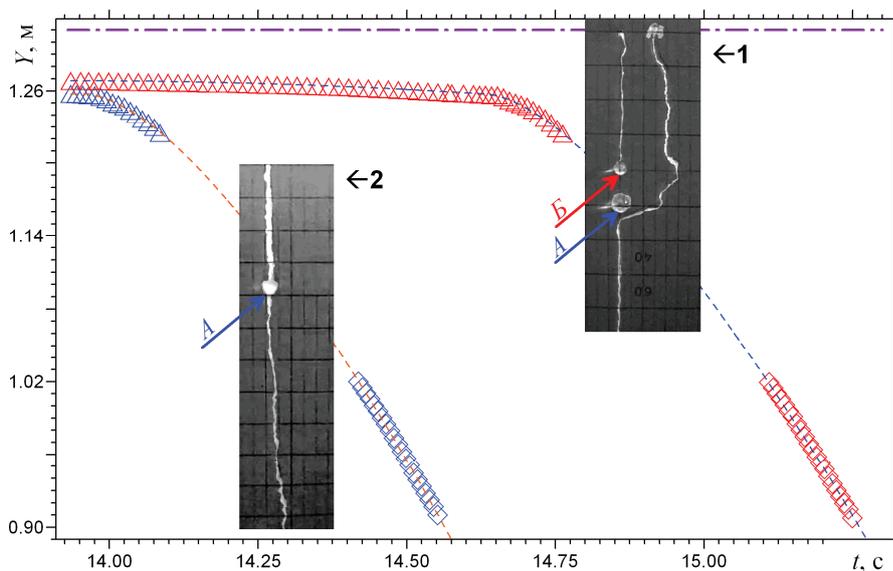


Рис. 5. Изменение положения на ривулете (расход $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$) нижней границы «капли» (А, Б), образующейся на краю малорасходного ривулета (расход $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$). 1 – верхний участок 1,32–1,20 м, 2 – нижний участок 1,03–0,91 м. Штрихпунктирная линия – расположение подающей трубки – 1,31 м

Fig. 5. Change of position of the «drop» (А, Б) lower bound on rivulet (consumption is $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$). The «drop» is formed on the edge of the low emission rivulet (consumption is $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$). 1 is the upper area 1,32–1,20 m, 2 is the lower area 1,03–0,91 m. dash-and-dot line is the position of the feed tube – 1,31 m

нестационарно-меандрирующего ривулета с ручейково-капельным. На рис. 4 видно как происходит взаимодействие двух ривулетов с отличными режимами течения. В течение 6–7 секунд формируется нестационарно-меандрирующий ривулет. В результате взаимодействия капля от малорасходного ривулета с нестационарно-меандрирующим через пять секунд ниже точки взаимодействия формируются прямоточное ривулетное течение.

Ускорение движения варикозного возмущения изменялось от $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ в точке соединения до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ в нижней части пластины. Частота отрыва капля от ривулета – порядка 2,5 Гц. На рис. 5 показано изменение положения на ривулете с расходом $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ нижней границы капли (А, Б), образующейся на краю малорасходного ривулета с расходом $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. Видеосъемка проводилась для двух участков по длине пластины от расположения подающей трубки (1,31 м), первый участок 1,32–1,20 м, второй 1,03–0,91 м. Видно, что до соприкосновения с основным ривулетом капля Б медленно сползает по подложке. После слияния капля А или Б с ривулетом скорость «капли» резко увеличивается. Однако по мере движения «капли» по ривулету ускорение скольжения уменьшается с 4 до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Капли оказывают

стабилизирующее действие на меандрирующий ривулет не только ниже точки слияния, но и выше. То есть возмущения, возникающие на ривулете, оказывают свое влияние и вниз, и вверх по течению струи. Таким образом, ускоренное движение «капли» оказывает стабилизирующее влияние на меандрирующий ривулет. Этот пример показывает, что понимание механизмов, определяющих характер движения ривулета, помогает управлять режимами течения ривулетов.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование течения ривулетов и капля по нижней стороне наклонной гидрофобной поверхности. Показано, что для капельного и ривулетно-капельного режима при условии постоянного расхода на выходе из подающей трубки направление движения и форма ривулета зависят от неравномерности расхода. Непостоянство расхода жидкости по длине ривулета наблюдалось и в других режимах. Показано, что одним из вариантов возникновения нестационарного меандрирования является изменение расхода в различных сечениях по длине ривулета. Режим течения ривулета может быть изменен при взаимодействии с другим ривулетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Heat and mass transfer intensification at stream absorption by surfactant additives / V.E. Nakoryakov, N.I. Grigoryeva, N.S. Bufetov, R.A. Dekhtyar // *International Journal Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – № 21–22. – P. 5175–5181.
- Логинов В.С., Озерова И.П. Оценка нестационарной теплоотдачи при пленочной конденсации пара на вертикальной стенке // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 67–69.
- Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Исследование неизотермической сорбции при переменной толщине сорбента // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2012. – Т. 10. – № 2. – С. 246–250.
- Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Boiling Crisis in Droplets of Ethanol Water Solution on the Heating Surface // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2013. – V. 22. – № 1. – P. 1–6.
- Саломатов В.В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324 – № 4. – С. 25–37.
- Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 256 с.
- Огуречников Л.А. Математическое моделирование процесса внутритрубного кипения неазеотропных смесей в испарителе пароконденсационного теплового насоса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2010. – Т. 82. – № 2. – С. 31–35.
- Towell G.D., Rothfeld L.B. Hydrodynamics of rivulet flow // *AIChE Journal*. – 1966. – V. 12. – № 5. – P. 972–980.
- Nakagawa T., Scott J.C. Stream meanders on a smooth hydrophobic surface // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1984. – V. 149. – P. 89–99.
- Myers T.G., Liang H.X., Wetton B. The stability and flow of a rivulet driven by interfacial shear and gravity // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2004. – V. 39. – P. 1239–1249.
- Gennes P.G. Wetting, statics and dynamics // *Review Modern Physics*. – 1996. – V. 57. – № 3. – P. 827–863.
- Перепелица Б.В. Визуализация потока при истечении круглой струи в узкий канал // *Сборник трудов XXIII семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием)*. – Томск, 2012. – С. 293–297.
- Kuznetsov V.V., Vitovskii O.V., Krasovskii V.A. An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface // *High Temperature*. – 2007. – V. 45. – № 2. – P. 77–84.
- Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение испаряющейся пленки жидкости // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324 – № 4. – С. 6–14.
- Козлобродов А.Н. Стеkanie пленки нелинейной вязкоупругой жидкости по боковой поверхности кругового цилиндра // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 182–185.
- Trifonov Yu.Ya. Viscous film flow down corrugated surfaces // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2004. – V. 45. – P. 389–400.
- Trifonov Yu.Ya. Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and the film free surface stability // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2000. – V. 10. – № 2. – P. 129–145.
- Bruinsma R. The statistical mechanics of meandering // *Journal de Physique*. – 1990. – V. 51. – № 9. – P. 829–845.
- Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение вертикального ривулета // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 50–56.
- Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Markovich D.M. Rivulet Flow on the Outer Surface of an Inclined Cylinder // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2008. – V. 17. – № 4. – P. 259–272.

Поступила 19.05.2015 г.

UDC 532.62:532.59

TRANSITIONAL REGIMES OF RIVULET GRAVITY FLOW ON THE BOTTOM SIDE OF AN INCLINED PLATE

Ruslan A. Dekhtyar,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Vladimir E. Nakoryakov,

Member of Russian Academy of Sciences, Kutateladze Institute
of Thermophysics SB RAS1, Acad. Lavrentiev Avenue, Novosibirsk,
630090, Russia. E-mail: nakve@itp.nsc.ru

Valeriy V. Ovchinnikov,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: avks@itp.nsc.ru

Ekaterina Yu. Slesareva,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: styuardessa@yandex.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to use liquid films in heat exchangers (steam generators of coal-fired power station, compressors of drilling device, absorbers, distillation columns, heat pumps etc.). Along with searches and development of traditional sources (gas, oil) the promising trend is the use of energy stored in the reservoirs, ground, geothermal sources, industrial emissions (air, water, drains, etc.) and its transformation to heat by means of thermal pumps. Now thermal pumps are energetically effective heating equipment.

The main aim of the research is to substantiate the selection of design models and programs for distributing devices of supplying absorbent solution based on the experimental data on rivulet flow on a hydrophobic surface at various orientation of a plate normal in relation to a gravity vector; to define the conditions under which the rivulet form and liquid stream direction change; to test the distributing devices, which are capable of stabilizing flow for non-stationary meandering rivulet.

The methods used in the study. The visualization of flow regimes by a high-speed video for rivulet on an inclined surface is used. Using the methods of digital processing of video frame, the parameters (size, velocity, acceleration) of various flow patterns for form deviation along rivulet are defined.

The results. The authors have obtained the experimental data of the rivulet flow regime on the bottom side of the inclined plate and determined the conditions for meandering rivulet. The data obtained allow testing the computing programs on adequacy of calculation results. The method of liquid flow stabilization at meandering rivulet is tested using the dripping device.

Key words:

Flow patterns, meandering, rivulet, drops, hydrophobic surface.

REFERENCES

1. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at stream absorption by surfactant additives. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 21–22, pp. 5175–5181.
2. Loginov V.S., Ozerova I.P. Otsenka nestatsionarnoy teplootdachi pri plnochnoy kondensatsii para na vertikalnoy stenke [Estimation of a non-steady heat transfer at film vapor condensation on a vertical wall]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 67–69.
3. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Issledovanie neizotermicheskoy absorbtсии pri peremennoy tolshchine absorbenta [Investigation of non-isothermal absorption by variable thickness of absorbent]. *Modern Science: researches, ideas, results, technologies*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 246–250.
4. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Boiling Crisis in Droplets of Ethanol Water Solution on the Heating Surface. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 1–6.
5. Salomatov V.V. Nauchnye osnovy sozdaniya i malozatratnoy rekonstruktsii ugolnykh parogeneratorov pod vikhrevuyu tekhnologiyu szhiganiya [Scientific foundations of development and low-cost reconstruction of coal steam generators for vortex combustion technology]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 25–37.
6. Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая energetika* [Renewable Energetics]. Moscow, Fizmatlit, 2012. 256 p.
7. Ogurechnikov L.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessy vnutritrubnogo kipeniya neazeotropnykh smesey v isparitele parokompressionnogo teplovogo nasosa [Mathematical modeling of intratubal boiling of non-azeotropic mixtures in evaporator of vapor-compression heat pump]. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2010, vol. 82, no. 2, pp. 31–35.
8. Towell G.D., Rothfeld L.B. Hydrodynamics of rivulet flow. *AIChE Journal*, 1966, vol. 12, no. 5, pp. 972–980.
9. Nakagawa T., Scott J.C. Stream meanders on a smooth hydrophobic surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, vol. 149, pp. 89–99.
10. Myers T.G., Liang H.X., Wetton B. The stability and flow of a rivulet driven by interfacial shear and gravity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, vol. 39, pp. 1239–1249.
11. Gennes P.G. Wetting, statics and dynamics. *Review Modern Physics*, 1996, vol. 57, no. 3, pp. 827–863.
12. Perepelitsa B.V. Vizualizatsiya potoka pri istechenii krugloy strui v uzkiy kanal [Visualization of a stream at the expiration of

- a round stream to the narrow channel]. *Sbornik trudov XXIII seminaru po struynym, otryvnyim i nestatsionarnym techeniyam (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Proc. XXIII All-Russian Seminar with international partnership on jet, separation, and non-stationary flows], Tomsk, 2012, pp. 293–297.
13. Kuznetsov V.V., Vitovskii O.V., Krasovskii V.A. An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface. *High Temperature*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 77–84.
 14. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Volnovoe techenie isparayushcheyssya plenki zhidkosti [Wave flow of the evaporating liquid film]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 6–14.
 15. Kozlobrodov A.N. Stekanie plenki nelineynoy vyazkoprugoy zhidkosti po bokovoy poverkhnosti krugovogo tsilindra [Film sintering of nonlinear viscous-elastic liquid on lateral surface of circular cylinder]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 182–185.
 16. Trifonov Yu.Ya. Viscous film flow down corrugated surfaces. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, vol. 45, pp. 389–400.
 17. Trifonov Yu. Ya. Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and the film free surface stability. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, vol. 10, no. 2, pp. 129–145.
 18. Bruinsma R. The statistical mechanics of meandering. *Journal de Physique*, 1990, vol. 51, no. 9, pp. 829–845.
 19. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Volnovoe techenie vertikalnogo rivuleta [Wave flow of a vertical rivulet]. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, iss. 1, pp. 25–28.
 20. Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Markovich D.M. Rivulet Flow on the Outer Surface of an Inclined Cylinder. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 259–272.

Received: 19 May 2015.

УДК 622.248.3: 243.063

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ШЛАМА НА СВОЙСТВА БУРОВЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН КОМПЛЕКСАМИ СО СЪЕМНЫМИ КЕРНОПРИЕМНИКАМИ НА ТАЛНАХСКОМ РУДНОМ УЗЛЕ

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Рожков Владимир Павлович,

д-р техн. наук, профессор каф. бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Каратаев Дмитрий Давидович,

начальник производственно-технологического отдела, ООО «Норильскгеология», Россия, 663330, г. Норильск, а/я 889. E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Матвеев Александр Валерьевич,

ст. преподаватель каф. бурения технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Юрьев Павел Олегович,

ассистент каф. литейного производства Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: pashka_urew@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследований влияния тонкодисперсного шлама на свойства буровых промывочных жидкостей при бурении скважин комплексами со съемными керноприемниками на Талнахском рудном узле. При бурении геологоразведочных скважин комплексами со съемными керноприемниками на 1000 м проходки в среднем выбуривается от 7 до 8 т горных пород.

Цель работы: исследование влияния тонкодисперсного шлама, попадающего в буровой раствор, при бурении скважин комплексами со съемными керноприемниками по глинистым горным породам и рудной зоне на Талнахском рудном узле, на свойства бурового раствора.

Методы исследования: методы рентген-флуоресцентной спектрометрии, электронной микроскопии, рентгеноспектрального, спектроскопического и томографического анализа для определения минерального состава глинистых горных пород; определения гранулометрического состава осадка бурового раствора (далее по тексту – шлам); определения дзета-потенциала и дебаевского радиуса; методы, описанные в ISO 10414–1 и ISO 13503–1.

Результаты. Исследование фракционного состава растворов с тонкодисперсным шламом позволило установить распределение частиц выбуренной породы по размерам. По степени коллоидной активности дисперсные глинистые частицы можно разделить на: очень активные размером 0,46...0,69 мкм; активные частицы размером от 1,10...3,32 мкм; малоактивные частицы размером от 5,46...10,28 мкм; не обладающие коллоидной активностью частицы с размерами 10,28...43,04 мкм. Средний геометрический размер частиц в растворах с тонкодисперсной фазой варьируется от 1,856 до 1,931 мкм. Привнесение в раствор активных и малоактивных частиц позволяет естественным путем получать растворы с дисперсной твердой фазой, которые образуют «глинистую» корку на стенке скважины при перепаде давления и обеспечивают кольматацию горных пород. Практика строительства скважин глубиной более 1500 м на Талнахском рудном узле подтверждает целесообразность применения тонкодисперсной фазы в составе бурового раствора для бурения глубоких скважин комплексами со съемными керноприемниками.

Ключевые слова:

Тонкодисперсный шлам, реологические параметры, фракционный состав, электростатическая характеристика, фильтрация, кольматация.

Введение

Поиски богатых медно-никелевых руд на глубоких горизонтах и флангах Талнахского рудного узла (ТРУ) являются на сегодняшний день одной из важнейших задач, поставленных руководством компании «Норильский никель» для увеличения потенциала Норильского промышленного района.

Геологическое опробование и поиски рудных зон на глубоких горизонтах осуществляется посредством бурения геологоразведочных скважин глубиной более 1500 м.

При бурении геологоразведочных скважин комплексами со съёмными керноприемниками (КССК) на Талнахском рудном узле в течение года (в среднем) перебуривается 16000 погонных метров глинистых и глинодержащих горных пород. При бурении в глинистых отложениях только часть разрушенной породы удаляется с забоя в виде крупного шлама, а остальная тонкоизмельченная фракция переходит в буровой раствор. Темп диспергирования и измельчения выбуренной глинистой горной породы в скважине зависит от ее природы, минерального состава, типа породоразрушающего инструмента (ПРИ), технологии промывки скважины, очистки бурового раствора [1]. При бурении скважин КССК используются импрегнированные алмазные коронки, поэтому разрушение горных пород происходит в результате режуще-раздавляющего действия алмазного реза [2, 3], что приводит к растиранию глинистых горных пород.

В работе [4] показано, что растирание приводит к изменению размеров частиц, увеличению поверхности и числа нарушенных связей глинистых и неглинистых минералов и, как следствие, к увеличению емкости катионного обмена.

Целью данной работы является исследование влияния тонкодисперсного шлама разрушенных глинистых горных пород на свойства бурового раствора при бурении глубоких скважин комплексами со съёмными керноприемниками на Талнахском рудном узле.

Организация экспериментальных исследований

1. Для уточнения вещественного состава осадочных горных пород были отобраны 29 образцов керна аргиллита и хлорита с 5 скважин (ЗФ-53, ЗФ-56, ЗФ-48, РТ-11, РТ-17), глубина отбора 886–1565 м. Исследование вещественного состава и строения пород проводилось в КНЦ СО РАН и Институте горного дела, геологии и геотехнологий СФУ. Определение элементного состава проводилось на рентген-флуоресцентном спектрометре BRUKER S2 Ranger (детектируемые элементы с Na до U). Электронно-микроскопическое изучение и микроанализ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM3000 с рентгеноспектральным анализатором BRUKER XFlash 430 H (детектируемые элементы от B до Am). Порошковые дифрактограммы образцов были сняты на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (линейный детектор VANTEC, Cu-K α -излучение).

Микроскопические исследования в проходящем свете выполнены с использованием микроскопа Axioskop 40 A Pol. Спектроскопический и томографический анализы были выполнены с помощью ЯМР микротомографа на основе Bruker AVANCE DPX 200. Для получения спектров по ядрам ¹H и томографических изображений образцы распиливались сухим пилением до параллелепипедов нужных размеров (20×2×30 мм). Для исследований взаимодействия с водой образцы помещались вертикально в контейнер с дистиллированной водой с глубиной погружения 3 мм.

2. Параметры отобранных буровых растворов оценивались по методикам, изложенным в международных стандартах ISO 10414-1 и ISO 13503-1, на приборах фирмы OFITE (США). Реологические параметры измеряли на ротационном вискозиметре 900 модели, фильтрацию – на пресс-фильтре при комнатной температуре и давлении 0,7 МПа. Дополнительно исследовали коагулирующие свойства коллоидных растворов из монтмориллонитовых глинопорошков и отобранных буровых растворов на тампонирующем тестере проницаемости OFITE (США).
3. Для определения количества и размера осадка бурового раствора были отобраны 49 проб буровых растворов со скважин РТ-4, РТ-20, РТ-103, СФ-6, СФ-12, СФ-14. Исследование электростатических характеристик проводилось в лаборатории дисперсных и наноструктурных, твердых, вязких и коллоидных материалов им. Л.И. Маминой Института цветных металлов СФУ. Определение гранулометрического состава осадка бурового раствора (далее по тексту – шлам) проводили на лазерном анализаторе FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec PLUS фирмы Fritsch (Германия), который позволяет определять частицы в жидкой среде и распределять их по размерам от 80 нм до 2 мм. Определение дзета-потенциала (ζ) и дебаевского радиуса (δ) проводилось на электроакустическом анализаторе Dispersion DT-310 фирмы Dispersion Technology Inc.

Минеральный состав исследуемых образцов горных пород

Минеральный состав изученных образцов по результатам рентгенфлуоресцентного, рентгенофазового и микроскопического (оптического и СЭМ) анализов представлен в работах [5, 6]. Для аргиллитов разведочной свиты характерно преобладание мусковита (50–77 %), кварца (8–28 %), шамозита и монтмориллонита (1–19 %, определялись совместно), плагиоклаза (0–6,4 %). Для отложений тунгусской серии характерно преобладание мусковита (38–65 %), кварца (21–43 %), плагиоклаза (2–12 %), шамозита и монтмориллонита (6–15 % по результатам рентгенофазового анализа). Содержание углистого вещества составляет до 25 %.

Исследование реологических параметров промывочных жидкостей с тонкодисперсным шламом

При бурении скважин комплексами со съемными керноприемниками решающее значение имеют реологические свойства растворов, от которых зависит в первую очередь интенсивность удаления бурового шлама. Неудовлетворительные реологические свойства могут привести к таким серьезным осложнениям, как образование пробок в стволе скважины, забивание шламом призабойной зоны, снижение механической скорости бурения, прихват буровой колонны, размыв стенок скважины и столбиков керна, поглощение бурового раствора [7]. В табл. 1 представлены исследования реологических свойств растворов с тонкодисперсным шламом, отобранных при бурении скважин на Талнахском рудном узле (состав и наименование растворов мас. %: базовый – гаммаксан – 0,1, низковязкая полианионная целлюлоза (ПАЦ) – 0,1, базовый + NaCl – 5; Норильск № 1 – гаммаксан – 0,15, низковязкая ПАЦ – 0,15, смазывающая добавка TORQUELESS 4 л/1000 л воды, NaCl – 5, содержание твердой фазы – 5 (глубина отбора 985 м, тунгусская серия); Норильск № 2 – гаммаксан – 0,1, низковязкая ПАЦ – 0,1, графит – 0,5, NaCl – 5, содержание твердой фазы – 6,5 (глубина отбора 1414 м, разведочнинская свита); Норильск № 3 – гаммаксан – 0,1, низковязкая ПАЦ – 0,1, графит – 0,5, высоковязкая ПАЦ – 0,1, NaCl – 5, содержание твердой фазы – 6 (глубина отбора 1562 м, рудная зона). Плотность растворов с тонкодисперсным шламом измерялась на рычажных весах фирмы Halliburton TRU-WATE™ и составила 1,06 г/см³ для раствора Норильск № 1, 1,09 г/см³ для растворов Норильск № 2, Норильск № 3.

В работе [7] практическими исследованиями установлено, что при объемной доле шлама, превышающей 5 %, происходят затяжки или прихват буровой колонны, когда прекращается циркуляция бурового раствора. В составе растворов Норильск № 1–3 содержится критическая масса тонкодисперсного шлама, что приводит к прихватам гладкоствольной колонны буровых труб при бурении наклонных скважин комплексами ССК на Талнахском рудном узле. Для очистки ствола скважины необходимо применять буровой раствор с высоким отношением предела текучести к пластической вязкости или с низким показателем нелинейности n . Таким требованиям отвечают разжижающиеся при сдвиге буровые растворы, в которых при прекращении циркуляции образуется прочная структура, позволяющая удерживать шлам во взвешенном состоянии. В результате лабораторных исследований нами установлены реологические параметры, при которых не происходит осаждения 5 % шлама из раствора. Показатель нелинейности $n \approx 0,36 \dots 0,45$; $K \approx 0,30 \dots 0,67$; $G_1 = 1-2$; $G_{10} \geq 2$.

При добавлении к исследуемым растворам жидкого стекла в количестве 50 мл/1000 мл ра-

створа наблюдается уменьшение показателя нелинейности, рост вязкости и статического напряжения сдвига, что хорошо согласуется с [8]. В слабощелочной среде и в присутствии электролитов частицы SiO₂ объединяются в слабосвязанные между собой агрегаты, образуя рыхлые осадки, которые визуально не определяются в непрозрачных растворах.

Таблица 1. Реологические параметры полимерных растворов с тонкодисперсной фазой

Table 1. Rheological parameters of polymeric solutions with finely divided phase

Наименование раствора Solution title	Реологические параметры Rheological parameters							
	Модель Бингама Bingham model					Степенная модель Power law model		
	PV	YP	R ²	G ₁	G ₁₀	n	K	R ²
Базовый/Basic	5,74	0,93	0,97	0	1	0,72	0,05	0,97
Базовый+NaCl-5 % Basic+ NaCl-5 %	4,50	0,450	0,97	0	0	0,85	0,01	0,94
Норильск № 1 Norilsk № 1	5,96	0,05	0,99	0	1	0,91	0,01	0,99
Норильск № 2 Norilsk № 2	4,14	1,22	0,98	0	0	0,68	0,08	0,99
Норильск № 3 Norilsk № 3	4,61	2,53	0,97	0	1	0,53	0,27	0,99
Норильск № 1+50 мл Na ₂ SiO ₃ Norilsk № 1+50 ml Na ₂ SiO ₃	3,27	0,87	0,98	1	1	0,50	0,11	0,99
Норильск № 2+50 мл Na ₂ SiO ₃ Norilsk № 2+50 ml Na ₂ SiO ₃	8,55	3,47	0,99	3	3	0,38	0,74	0,96
Норильск № 3+50 мл Na ₂ SiO ₃ Norilsk № 3+50 ml Na ₂ SiO ₃	12,07	4,25	0,99	3	4	0,42	0,79	0,98

Примечание: PV – пластическая вязкость, мПа·с; YP – предел текучести, Па; R² – коэффициент корреляции; n – показатель нелинейности; K – консистенция раствора, мПа·сⁿ; G₁ – статическое напряжение сдвига через 10 секунд, Па; G₁₀ – статическое напряжение сдвига через 10 минут, Па; плотность жидкого стекла – 1,33 г/см³.

Note: PV is the plastic viscosity, mPa·s; YP is the yield point, Pa; R² is the correlation coefficient; n is the nonlinearity factor; K is the solution consistency, mPa·sⁿ; G₁ is the static shear stress in 10 seconds, Pa; G₁₀ is the static shear stress in 10 minute, Pa; liquid glass density is 1,33 g/cm³.

Анализ вышеизложенного показал, что растворы с тонкодисперсным шламом не отвечают реологическим требованиям для очистки ствола скважины и безаварийной работы. Необходимо отметить, что при бурении глубоких скважин КССК на Талнахском рудном узле буровые растворы не очищают техническими средствами, а осаждение осадка происходит естественным путем за счет осаждения твердой фазы в отстойниках. При накоплении массы шлама, превышающей критическую (5–6 %), производится сброс раствора и очистка приемной емкости.

Гранулометрическая характеристика тонкодисперсного шлама

В химии [9] к коллоидам относят частицы размером от 0,1 мкм до 1 мкм. В почвоведении и грунтоведении к коллоидным частицам относят частицы большего размера, поскольку они, так же как истинные коллоиды, способны агрегировать, адсорбировать на поверхности ионы, перемещаться в поле постоянного электрического тока (электрофорез) или, находясь в покое, допускать движение воды (электроосмос). Такими свойствами в глинистых грунтах обладают частицы размером значительно большим чем 0,1 мкм. Глинистые частицы размером менее 1 мкм обладают характерными коллоидными свойствами. Однако частицы больших размеров от 1 до 10 мкм также проявляют коллоидные свойства, хотя в значительно меньшей степени. Можно считать, что эти частицы являются активными, т. е. определяющими процессы коагуляционного структурообразования в глинистых грунтах. Однако активность этих частиц различная и при прочих равных условиях зависит от их размера и формы. За границу между глинистыми и пылеватыми частицами принят размер зерен 5 мкм. Исходя из изложенного, считается возможным по степени коллоидной активности дисперсные глинистые частицы разделить на: очень активные – размером менее 1 мкм; активные – размером 1–5 мкм; малоактивные – размером 5–10 мкм. Частицы размером более 10 мкм коллоидной активностью не обладают [10]. Наиболее информативной характеристикой буровых растворов с тонкодисперсным шламом является гранулометрический (фракционный) состав – распределение дисперсной фазы по размерам частиц, выраженное в виде аналитических выражений или графически интегральный или дифференциальный гранулометрический состав дисперсной фазы [11]. На рисунке представлены кумулятивные кривые распределения частиц в растворах Норильск № 1–3.

Полученные результаты показали, что основными преобладающими фракциями в растворах Норильск № 1–3 являются фракции 1,856...1,931 мкм, которые можно отнести к активным коллоидным частицам.

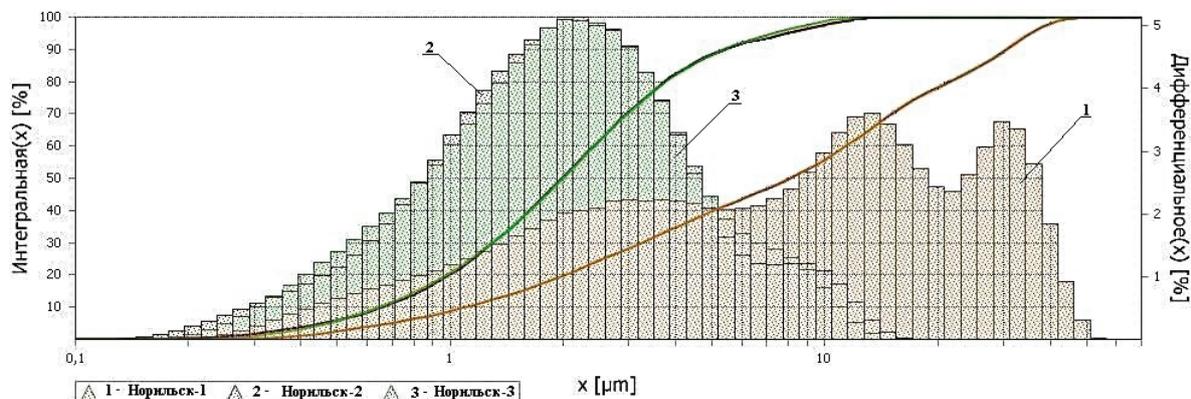


Рисунок. Кумулятивные кривые распределения частиц в растворах Норильск № 1–3

Figure. Cumulative Particle Frequency Curve in solutions Norilsk № 1–3

Определение электростатических характеристик

Для симметричного одновалентного электролита (NaCl, KCl, LiCl) величина дебаевского радиуса линейно уменьшается с ростом концентрации электролита $C_0^{1/2}$, т. е. дебаевский радиус не зависит от поверхностного заряда и электрокинетического потенциала, а при постоянной температуре является функцией концентрации C_0 электролита и заряда ионов [12].

В табл. 2 представлены электростатические характеристики растворов с тонкодисперсным шламом и суспензий из монтмориллонитовых глин.

Таблица 2. Электростатические характеристики исследуемых дисперсных систем

Table 2. Electrostatic characteristics of the studied dispersed systems

Наименование раствора Solution title	Дзета-потенциал (ξ), mV Zeta-potential (ξ), mV	Дебаевский радиус* (δ), нм Debye shielding length* (δ), nm
«Бароид» «Baroid»	20,37	2,82
«Таганский» «Tagansky»	16,53	6,74
Норильск № 1 Norilsk № 1	5,85	0,52
Норильск № 2 Norilsk № 2	7,07	0,65
Норильск № 3 Norilsk № 3	8,92	0,41

Примечание: «Бароид» – бентонит TUNNEL-GEL PLUS фирмы Бароид является специальной смесью вайомингского бентонита с полимерными добавками; «Таганский» – монтмориллонитовая глина Таганского месторождения; * – приведенная толщина диффузного слоя или радиус ионной атмосферы; концентрация бентонита в растворе – 6 мас. %.

Note: «Baroid» is the bentonite TUNNEL-GEL PLUS of the company Baroid, special mixture of Wyoming bentonite with polymeric additives; «Tagansky» is the montmorillonite clay of Taganskoe deposit; * is the effective thickness of diffuse layer or ionic atmosphere radius; bentonite concentration in solution is 6 wt. %.

Результаты экспериментальных исследований показали, что растворы с тонкодисперсным шламом характеризуются низкими значениями дзета-

потенциала и дебаевского радиуса. Дзета-потенциал определяет степень и характер взаимодействия между частицами дисперсной системы. Величину дзета-потенциала (30 мВ) [13] (положительную или отрицательную) можно рассматривать как характерное значение для условного разделения низко-заряженных и высоко-заряженных поверхностей. Чем больше электрокинетический потенциал, тем устойчивее коллоид.

Исследование фильтрационных и коагулирующих способностей исследуемых растворов

В работах [14–16] показано, что раствор без тонкодисперсной фазы не создает достаточного давления на стенку скважины и поэтому перепад давления на горную породу в стенке скважины очень мал. Поэтому устойчивость стенок ствола скважины повышается при применении растворов с низкими фильтрационными параметрами за счет образования непроницаемой фильтрационной корки в порах и микротрещинах горных пород.

Анализ публикаций [17–19] и результатов бурения контрольно-стволовых скважин (КС-55, КС-56, КС-57) с фактическими глубинами 1430, 2069, 2070 м, предоставленных специалистами ООО «Норильскгеология», показал следующее:

- 1) большое влияние на показатели физико-механических свойств горных пород оказывает неоднородность строения и состава пород, связанная с текстурными особенностями и минералогическим составом;
- 2) аргиллиты широко распространены в разведочной свите, это плитчатые, метаморфизованные плотные породы, содержащие значительное количество гидрослюдистых частиц, тонкодисперсных темно-серых и черных; в них имеются скопления органических включений, встречаются тонкие трещины, заполненные органическим веществом, и прослойки ангидрита; уменьшение прочности характерно для разностей, содержащих углистый материал; в водонасыщенном состоянии прочность на сжатие уменьшается с 61 до 44 МПа; отмечена анизотропия свойств, коэффициент анизотропии – 1,2;
- 3) при водонасыщении прочность всех пород снижается на 15–30 %; наибольшее снижение прочности обнаружено у пикритовых базальтов;
- 4) наиболее резкое уменьшение прочности наблюдается при переходе от тектонически нарушенных массивов к массивам со средней трещиноватостью;
- 5) показатели прочности горных пород на сжатие и растяжение уменьшаются на 50–60 % при трещинной пустотности от 3 до 5 %;
- 6) при изменении коэффициента трещиноватости горных пород разведочной свиты от 5 до 8–10 % уменьшение прочности на сжатие и разрыв составляет 30–40 %;
- 7) чередование аргиллитов, алевролитов, песчаников и углей обуславливает сильную изменчивость первичной трещиноватости;
- 8) в менее прочных породах (аргиллитах и углях) трещины располагаются чаще, чем в более прочных – алевролитах и песчаниках;
- 9) в аргиллитах и углях расстояние между трещинами достигает 0,5–2 см;
- 10) наименьшей величиной трещинной пустотности среди пород терригенного комплекса обладают песчаники (1,8 %), наибольшей – аргиллиты (3,8 %) и угли (4 %);
- 11) крупные тектонические нарушения сопровождаются зонами дробления, в которых породы разрушены до состояния мелкой щебенки и иногда даже до дресвы, раздробленный материал местами цементирован глиной трения, кальцит-цеолитовым материалом; величина трещинной пустотности в таких зонах составляет 10 % и более;
- 12) размер пор в исследуемых образцах изменяется от 0,1 до 5 мкм, а в образцах из тектонических зон от 1 до 60 мкм;
- 13) пористость глинистых горных пород варьирует от 0,9 до 12,09 %.
- 14) визуальный анализ кернового материала показал, что большая часть трещин ориентирована перпендикулярно к оси скважины или близко к этому.

При бурении скважины мгновенная фильтрация может быть весьма значительная, если породы имеют высокую проницаемость, а буровой раствор не содержит частиц, соответствующих размерам микротрещин или пор. Перемычки способны образовываться только частицы, размер которых находится в определенном соотношении с размерами микротрещин и пор. Частицы определенного критического размера застревают в поровых и трещинных каналах и образуют сводовые перемычки непосредственно у поверхности пористого пласта [20]. После образования такой перемычки начинают удерживаться и более мелкие частицы, вплоть до активных дисперсных, имеющих размер 0,47...5,00 мкм. Такие размеры соответствуют фракциям, которые входят в состав растворов Норильск № 1–3. По данным [7], частицы, размер которых не превышает одной трети диаметра круглого отверстия сита, способны образовать сводовую перемычку у такого отверстия. В течение многих лет расчет фракционного состава проводили по методу Абрамса [21], который установил размер частиц аналогичный представленному в исследованиях Кюберли. Содержание частиц указанного размера должно быть не менее 5 % от объема твердых частиц, находящихся в растворе. Этим критериям отвечает фракционный состав твердой фазы в растворах Норильск № 1–3.

Экспериментальную проверку проводили на фильтр-прессе и на тампонирующем тестере проницаемости фирмы OFITE.

На первом этапе измеряли фильтрационные характеристики на фильтр-прессе на бумажном фильтре при давлении 0,7 МПа. В результате фильтрация составила 60; 38; 28 мл за 30 минут для ра-

створов Норильск № 1–3, соответственно. Толщина корки из тонкодисперсного шлама составила менее 1 мм, но необходимо отметить наличие в корке частиц различного размера. Это на наш взгляд привело к повышенной фильтрации, что можно объяснить наличием электролита в растворах. Добавление солей вызывает флокуляцию и агрегацию дисперсных частиц, что подтверждается вышеизложенными исследованиями дзета-потенциала.

На втором этапе исследовали фильтрационные характеристики на тампонирующем тестере проницаемости фирмы OFITE на керамическом фильтре-диске New (Mercury) 10 micron OLD (AIR) 3 micron 2,5"×0,25". Фильтрация для растворов Норильск № 2–3 при перепаде давления 1,7 и 4,3 МПа за 30 минут составила 62; 47 мл и 58; 62 мл, толщина фильтрационной корки 0,8 мм. При визуальном осмотре излома дисков тонкодисперсный шлам внутри не обнаружен. Кроме этого, на указанных дисках при дифференциальном давлении 4,3 МПа исследовали фильтрационные характеристики растворов Норильск № 1–3 с 50 мл на литр раствора жидкого стекла ($\rho=1,33 \text{ г/см}^3$). Фильтрационные потери составили 400 мл за 15 минут (Норильск № 1), 323 мл за 30 минут (Норильск № 2), 140 мл за 7,5 минут (Норильск № 3). Наблюдалось четкое разделение на жидкую и твердую фазы, причем практически вся тонкодисперсная фракция оседала на фильтре.

В водных растворах поликонденсация силикатных ионов приводит к формированию частиц SiO_2 нанодисперсных размеров; в кислой среде такие первично сформированные частицы объединяются в разветвленные цепочки, которые образуют сетку геля, пронизывающую водную фазу по всему объему. В слабощелочной среде и в присутствии электролитов (в нашем случае NaCl) частицы SiO_2 объединяются в слабосвязанные между собой агрегаты, образуя рыхлые осадки [22]. Такой осадок наблюдался в процессе фильтрации при давлении 4,3 МПа через керамический диск, что подтверждает несовместимость простых солей с жидким стеклом. При обработке жидким стеклом солевых растворов с тонкодисперсным шламом реакция визуально не проявляется, раствор загущается, появляется структура, но при перепаде давления осадок может привести к необратимым последствиям. В частности, к насыщению горной породы жидкостью и образованию толстой рыхлой корки, что может привести к дифференциальному прихвату.

Вышеописанные лабораторные исследования послужили основой для исследования кольматирующей способности буровых растворов на керамических дисках. Кольматирующую способность оценивали по изменению проницаемости на приборе профильного измерения проницаемости полноразмерного ядра (модель PDPK-400). Методика экспериментов заключалась в следующем: измеряли проницаемость керамических дисков в сухом состоянии, далее через диск при давлении 4,3 МПа фильтровали исследуемый раствор. После выемки

диска тонким лезвием счищали фильтрационную корку, промокали бумажной салфеткой и после этого измеряли проницаемость. В табл. 3–5 представлены результаты исследований.

Таблица 3. Проницаемость фильтрационных дисков (Ceramic Filter Disc 2,5"×0,25" New (Mercury) 50 micron, Old (Air) 35 micron) после фильтрации растворов с тонкодисперсной фазой

Table 3. Permeability of filtration discs Ceramic Filter Disc 2,5"×0,25" New (Mercury) 50 micron, Old (Air) 35 micron) after filtering solution with finely divided phase

Проницаемость по газу, мД Permeability to gas, mD				Название раствора Solution title	Условный коэффициент кольматации, K_2/K_1 Colmatation nominal coefficient, K_2/K_1	Фильтрация, мм, за 30 минут и вид фильтрата при $\Delta p=4,3 \text{ МПа}$ Filtration, mm, for 30 minutes and filter type at $\Delta p=4,3 \text{ МПа}$	
P_c , бар	K_1	P_k , бар	K_2			V, мл (ml)	Вид фильтрата Filter type
0,48	15693	0,49	14712*	–	0,94	–	–
0,49	14441	1,59	4087	Таганский Tagansky	0,28	80	Раствор solution
0,50	14492	1,09	6101	Инбент Inbent	0,42	44	раствор (34), вода (10) solution (34), water (10)
0,50	14796	1,55	4200	Бароид Baroid	0,28	40	раствор (20), вода (20) solution (20), water (20)
0,52	13321	1,48	4483	Норильск № 1 Norilsk № 1	0,34	250	раствор (64), вода (186) solution (64), water (186)
0,66	10240	2,25	2787	Норильск № 3 Norilsk № 3	0,27	150	раствор (76), вода (74) solution (76), water (74)

Примечание: *диск вымочен в дистиллированной воде в течение 10 минут; P_c – перепад давления при измерении проницаемости на необработанном сухом диске; P_k – перепад давления при измерении проницаемости после загрязнения керамического диска раствором; K_1 – проницаемость по газу (мД) сухого диска; K_2 – проницаемость по газу (мД) загрязненного диска; Δp – дифференциальное давление.

Note: *disc is macerated in distilled water during 10 minutes; P_c is the pressure fall at permeability change on untreated dry disc; P_k is the pressure fall at permeability change after contamination of ceramic disc with the solution; K_1 is the permeability to gas (mD) of a dry disc; K_2 is the permeability to gas (mD) of a contaminated disc; Δp is the differential pressure.

Для сравнения исследовали коллоидные растворы, приготовленные из высококачественного бентонита с добавками и без добавок полимеров. Таганский раствор – из монтмориллонитовой глины Таганского месторождения (5 мас. %) с добавкой 0,5 мас. % кальцинированной соды. Бароид – из вайомингского бентонита (4 мас. %, торговая марка Tunnel-Gel Plus). Инбент – из модифицированного бентонита (Россия, 4 мас. %). Черногорский – из черногоского бентонита марки ПБМА (5 мас. %). В табл. 3–5 представлены данные по изменению проницаемости керамических дисков после вымачивания их в дистиллированной воде в течение 10 минут для сравнения с изменением проницаемости после фильтрации растворов.

Таблица 4. Проницаемость фильтрационных дисков (Ceramic Filter Disc 2,5×0,25" New (Mercury) 40 micron, Old (Air) 20 micron) после фильтрации растворов с тонкодисперсной фазой

Table 4. Permeability of filtration discs (Ceramic Filter Disc 2,5×0,25" New (Mercury) 40 micron, Old (Air) 20 micron) after filtering solution with finely divided phase

Проницаемость по газу, мД Permeability to gas, mD				Название раствора Solution title	Условный коэффициент кольматации, K_2/K_1 Colmatation nominal coefficient, K_2/K_1	Фильтрация, мм, за 30 минут и вид фильтрата при $\Delta p=4,3$ МПа Filtration, mm, for 30 minutes and filter type at $\Delta p=4,3$ MPa	
P_c , бар	K_1	$P_{c\kappa}$, бар	K_2			V, мл (ml)	Вид фильтрата Filter type
0,70	8598	0,77	7961*	–	0,93	–	–
0,81	7082	1,88	3065	Таганский Tagansky	0,43	28	Раствор solution
0,81	7245	1,59	3736	Инбент Inbent	0,52	36	раствор (24), вода (12) solution (24), water (12)
0,82	6917	3,13	1663	Бароид Baroid	0,24	30	Раствор (15), вода (15) solution (15), water (15)
0,67	8536	2,71	2084	Норильск № 3 Norilsk № 3	0,24	110	раствор (32), вода (78) solution (32), water (78)
0,87	6380	1,38	3979	Черногорский Chernogorsky	0,62	34	раствор (16), вода (18) solution (16), water (18)

Примечание: *диск вымочен в дистиллированной воде в течение 10 минут.

Note: *disc is macerated in distilled water during 10 minutes.

Таблица 5. Проницаемость фильтрационных дисков (Ceramic Filter Disc 2,5×0,25" New (mercury) 20 micron, Old (Air) 10 Micron) после фильтрации растворов с тонкодисперсной фазой

Table 5. Permeability of filtration discs (Ceramic Filter Disc 2,5×0,25" New (Mercury) 20 micron, Old (Air) 10 micron) after filtering solution with finely divided phase

Проницаемость по газу, мД Permeability to gas, mD				Название раствора Solution title	Условный коэффициент кольматации, K_2/K_1 Colmatation nominal coefficient, K_2/K_1	Фильтрация, мм, за 30 минут и вид фильтрата при $\Delta p=4,3$ МПа Filtration, mm, for 30 minutes and filter type at $\Delta p=4,3$ MPa	
P_c , бар	K_1	$P_{c\kappa}$, бар	K_2			V, мл (ml)	Вид фильтрата Filter type
1,08	3859	1,09	3819	–	0,99	–	–
1,11	3779	2,00	2097	Таганский Tagansky	0,55	20	вода/water
1,37	2800	3,02	1338	Таганский Tagansky	0,48	24**	раствор (12), вода (12) solution (12), water (12)
1,33	2987	2,95	1510	Норильск № 1 Norilsk № 1	0,51	134	вода/water
1,03	3412	5,40	533	Норильск № 3 Norilsk № 3	0,16	84	вода/water
1,30	2991	2,01	2051	Черногорский Chernogorsky	0,69	40	раствор (12), вода (28) solution (12), water (28)

Примечание: * – диск вымочен в дистиллированной воде в течение 10 минут; ** – фильтрация измерялась при дифференциальном давлении, равном 9 МПа.

Note: *disc is macerated in distilled water during 10 minutes; ** filtration was measured at differential pressure 9MPa.

Анализ экспериментальных результатов, представленных в табл. 3–5, показал следующее:

- 1) проницаемость керамических дисков, вымоченных в дистиллированной воде, незначительно отличается от проницаемости исходных дисков;
- 2) высокая кольматирующая способность наблюдалась при применении коллоидных растворов из монтмориллонитовых глин (Бароид, Таганский, Инбент, Черногорский);
- 3) при прокачивании растворов Норильск № 1, 3 через керамические диски с различной пористостью при перепаде давления 4,3 МПа отме-

- чалась повышенная фильтрация жидкости, что в реальных условиях может привести к понижению прочности горных пород;
- 4) при прокачивании раствора Норильск № 3 через диск с размером пор 10 мкм наблюдалось отложение внешней корки из тонкодисперсного шлама на наружной поверхности диска, через которую проходит водный фильтрат;
 - 5) образование внутренней фильтрационной корки зафиксировано при прокачивании Таганского раствора через керамический диск с размером пор 10 мкм, при увеличении давления с 4,3 до 9,0 МПа;
 - 6) в целом экспериментальные результаты подтверждают предположение [7] о том, что мельчайшие частицы сначала не вызывают заметного снижения проницаемости, но после фильтрации и образования внутренней корки проницаемость становится очень низкой, вероятно, в результате миграции частиц различного фракционного состава. В скважине происходит два вида фильтрации – статическая и динамическая, что не всегда можно смоделировать в лаборатории.
- Выводы**
1. Исследование фракционного состава растворов с тонкодисперсным шламом позволило установить фракционный состав (мкм) выбуренной породы в процентном отношении (0,47...0,69–5 %; 0,65...1,10–5 %; 1,14...2,57–15 %; 2,00...8,06 – 25 %; 3,32...17,73–25 %; 5,39...30,45–15 %; 7,28... 35,48–5 %; 10,28... 43,04–4 %. Для сравнения распределение частиц по фракциям в коллоидных суспензиях Бароид и Инбент (концентрация глины 6 мас. %) в процентном отношении (0,67... 0,80–5 %; 0,93...1,24–5 %; 1,69... 2,76–15 %; 3,25... 6,49–25 %; 6,52... 10,14–25 %; 9,13... 12,62–15 %; 10,4...13,97–5 %; 12,57...16,48–4 %).
 2. Средний геометрический размер частиц в растворах с тонкодисперсной фазой варьируется от 1,856 до 1,931 мкм.
 3. По степени коллоидной активности дисперсные глинистые частицы можно разделить на: очень активные – размером 0,46...0,69 мкм, активные – размером 1,10...3,32 мкм, малоактивные – размером 5,46...10,28 мкм, не обладающие коллоидной активностью – с размерами 10,28...43,04 мкм.
 4. Реологические параметры исследуемых растворов не соответствуют критериям, обеспечивающим очистку скважины от шлама.
 5. Добавление в растворы с тонкодисперсным шламом (имеющих в своем составе поваренную соль) низковязкой полианионной целлюлозы приводит к осаждению дисперсной фазы в состоянии покоя, что крайне нежелательно при бурении скважин комплексами КССК.
 6. В результате лабораторных исследований авторами установлены величины реологических параметров, при которых не происходит осаждения 5 % шлама из раствора. Показатель нелинейности $n \approx 0,36...0,45$; $K \approx 0,3...0,67$; $G_1 = 1-2$; $G_{10} \geq 2$. Такие параметры можно получить за счет обработки растворов с тонкодисперсным шламом биополимерами, в частности гаммаксаном. Минимальная концентрация гаммаксана в растворе должна быть не менее 0,25...0,30 мас. %
 7. Добавление поваренной соли в раствор приводит к снижению дзета-потенциала и дебаевского радиуса, что в конечном итоге приводит к осаждению дисперсной фазы в состоянии покоя. Для поддержания твердой фазы необходимо в раствор добавлять биополимеры, например гаммаксан.
 8. Лабораторные исследования показали невозможность обработки растворов с тонкодисперсной фазой, имеющих в своем составе поваренную соль, жидким стеклом.
 9. Необходимо отметить, что привнесение в раствор активных и малоактивных частиц позволяет естественным путем создавать растворы с дисперсной твердой фазой, которые создают «глинистую» корку на стенке скважины при перепаде давления и обеспечивают кольматацию горных пород. Последующие исследования будут направлены на создание растворов с тонкодисперсной фазой с регулируемой фильтрацией.
 10. В настоящее время на участке «Скалистый» Талнахского рудного узла начали бурить наклонные скважины глубиной до 1000 м комплексами ССК, поэтому необходимы дополнительные лабораторные и производственные исследования по влиянию шлама и его количества на свойства растворов и их связь с поведением в скважине.
 11. Практика строительства скважин глубиной более 1500 м на Талнахском рудном узле подтверждает необходимость продолжения начатых лабораторных исследований с последующей производственной проверкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев В.Л. Технологические свойства буровых растворов. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
2. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Красноярск, Изд-во СФУ, 2014. – 336 с.
3. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Томск: ТПИ, 1979. – 99 с.
4. Кульчицкий Л.И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1975. – 212 с.
5. Исследование влияния растворов солей на гидратацию глинистых минералов при бурении скважин на примере Талнахского рудного узла / А.Л. Неверов, В.П. Рожков, Д.Д. Каратаев, А.А. Неверов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 103–117.
6. Анализ горно-геологических условий бурения скважин на Талнахском рудном узле / В.В. Нескоромных, А.Л. Неверов, В.П. Рожков, Д.Д. Каратаев, А.А. Неверов // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 100–111.
7. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) / пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
8. Брыков, А.С. Силикатные растворы и их применение. – СПб.: СПб ГТИ (ТУ), 2009. – 54 с.
9. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
10. Михеева Е.В., Пикун Н.П. Физическая и коллоидная химия. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 267 с.
11. Королев Д.В., Наумов В.Н., Суворов К.А. Определение дисперсного состава порошков микроскопическим методом. – СПб.: ГОУ ВПО СПб ГТИ (ТУ), 2005. – 41 с.
12. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
13. Савицкая Т.А. Коллоидная химия: строение двойного электрического слоя, получение и устойчивость дисперсных систем. – Минск: БГУ, 2011. – 82 с.
14. Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 229 с.
15. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Изд-во «Летопись», 2005. – 664 с.
16. Войтенко В.С. Управление горным давлением при бурении скважин. – М.: Недра, 1985. – 181 с.
17. Геология и рудоносность Норильского района / О.А. Дюжиков, В.В. Дистлер, Б.М. Струнин, А.К. Мкртычян, М.Л. Шерман, С.Ф. Служеникин, А.М. Лурье. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
18. Инженерно-геологические условия месторождений сульфидных медно-никелевых руд Талнахского рудного узла в полях рудников «Скалистый» и «Глубокий» / Г.А. Голодковская, Л.В. Шаумян, Э.С. Балашайтис, М.Б. Куринов, В.В. Ковалко, Н.А. Румянцева, И.А. Уткина, В.Н. Широков – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 561 с.
19. Додин Д.А., Батуев Б.Н. Геология и петрология талнахских дифференцированных интрузий и их метаморфического ореола // Петрология и рудоносность талнахских и норильских дифференцированных интрузий. – Л.: Недра, 1971. – С. 31–101.
20. Никифоров А.И., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. О переносе дисперсных частиц двухфазным фильтрационным потоком // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 47–53.
21. Теории подбора фракционного состава кольматанта / Г.Г. Ишбаев, Р.Р. Дильмиев, А.В. Христенко, А.А. Милейко // Бурение и нефть. – 2011. – № 6. – С. 16–18.
22. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло. – СПб.: Стройиздат, 1996. – 216 с.

Поступила 29.06.2015 г.

UDC 622.248.3: 243.063

STUDY OF FINELY DIVIDED SLUDGE EFFECT ON DRILLING FLUIDS PROPERTIES WHILE DRILLING WITH COMPLEXES WITH DETACHABLE CORE RECEIVER AT TALNAKHSKOE DEPOSIT

Aleksandr L. Neverov,

Siberian Federal University, 79, Svobodny, Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Vladimir P. Rozhkov,

Siberian Federal University, 79, Svobodny, Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Dmitri D. Karataev,

Norilskgeologiya, post office box 889, Norilsk, 663330, Russia. E-mail: dd.karataev@norilskgeology.ru

Aleksandr V. Matveev,

Siberian Federal University, 79, Svobodny, Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sfu.ttr@yandex.ru

Pavel O. Yuryev,

Siberian Federal University, 79, Svobodny, Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: pashka_urew@mail.ru

Relevance of the research is caused by the necessity to study the effect of finely divided sludge on properties of drilling fluids while drilling with complexes with detachable core receiver at Talnakhskoe deposit. When drilling the exploration wells with the complexes with wireline at 1000 m of sinking from 7 to 8 tons of rocks are drilled out at the average.

The main aim of the research is to study the effect of finely divided sludge, entering the drilling fluid, while boring with complexes with detachable core receiver on clay rocks and ore zone at Talnakhskoe deposit, on drilling fluid properties.

The methods used in the study: methods of X-ray fluorescence spectrometry, electron microscopy, X-ray, tomography and spectroscopic analysis to determine the mineral composition of argillaceous rocks; determination of particle size distribution of drilling fluid sludge (hereinafter – the sludge); determination of zeta potential and the Debye radius; methods described in ISO 10414-1 and ISO 13503-1.

The results. The study of fractional composition of solutions with finely divided sludge allowed establishing particle size distribution in drill cuttings. The dispersion clay particles can be divided according to the degree of the colloidal activity into: very active 0,46...0,69 μm in size; active 1,10...3,32 μm in size; less active ranging in size from 5,46...10,28 μm ; non-colloidal active with dimensions 10,28...43,04 μm . The geometric mean size of particles in finely dispersed phase solutions ranges from 1,856 to 1,931 μm . Bringing of active and inactive particles in a solution is a natural way to create solutions with the dispersed solid phase, which form a «clay» crust on the borehole wall with a pressure drop and provide rock colmatation. Experience in constructing a well of more than 1,500 m on the Talnakh deposits confirms the appropriateness of applying the finely divided phase in drilling fluid composition to bore deep wells with complexes with detachable core receiver.

Key words:

Finely divided sludge, rheological parameters, fractional composition, electrostatic characteristics, filtration, colmatation.

REFERENCES

- Mikheev V.L. *Tekhnologicheskiye svoystva burovyykh rastvorov* [Technological properties of drilling fluids]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 239 p.
- Neskoromnykh V.V. *Razrushenie gornyykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 336 p.
- Sulakshin S.S. *Razrusheniye gornyykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks during drilling]. Tomsk, TPI Publ., 1979. 99 p.
- Kulchitskiy L.I. *Rol vody v formirovaniy svoystv glinistykh porod* [The role of water in formation of properties of argillaceous rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 212 p.
- Neverov A.L., Rozhkov V.P., Karataev D.D., Neverov A.A. Issledovaniye vliyaniya rastvorov soley na gidratatsiyu glinistykh mineralov pri burenii skvazhin na primere Talnakhskogo rudnogo uzla [Investigation of the effect of salt solutions on the hydration of clay minerals in drilling wells by the example of Talnakh Deposits]. *Bulltin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 103–117.
- Neskoromnykh V.V., Neverov A.L., Rozhkov V.P., Karatayev D.D., Neverov A.A. Analiz gorno-geologicheskikh uslovy bureniya skvazhin na Talnakhskom rudnom uzle [Analysis of geological conditions of drilling wells in the Talnakh Deposits]. *Bulltin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 100–111.
- Grey J.R., Darli G.S.G. *Sostav i svoystva burovyykh agentov (promyvochnyykh zhidkostey)* [Composition and properties of drilling agents (drilling fluids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985, p. 509.
- Brykov A.S. *Silikatnye rastvory i ikh primenenie* [Silicate solutions and their usage]. St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University) Publ., 2009. 54 p.
- Fridrikhsberg D.A. *Kurs kolloidnoy khimii. 2-e izd* [Course of Colloid Chemistry. 2nd ed.]. Leningrad, Khimiya Publ., 1984. 368 p.
- Mikheyeva E.V., Pikula N.P. *Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya* [Physical and Colloid Chemistry]. Tomsk, TPU Publ., 2009. 267 p.
- Korolev D.V., Naumov V.N., Suvorov K.A. *Opreделение dispersnogo sostava poroshkov mikroskopicheskim metodom* [Determination of powders dispersed by microscopic method]. St. Petersburg, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University) Publ., 2005. 41 p.
- Sergeeva E.M. *Teoreticheskoye osnovy inzhenernoy geologii. Fiziko-khimicheskiye osnovy* [Theoretical foundations of engineering geology. Physico-chemical basis]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 288 p.
- Savitskaya T.A. *Kolloidnaya khimiya: stroeniye dvoynogo elektricheskogo sloya, polucheniye i ustoychivost dispersnykh system* [Colloid chemistry: electric double layer structure, acquisition and stability of disperse systems]. Minsk, BSU Publ., 2011. 82 p.
- Gorodnov V.D. *Fiziko-khimicheskiye metody preduprezhdeniya oslozhneniy v burenii* [Physico-chemical methods of preventing complications in drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 2nd ed., 229 p.
- Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 664 p.
- Voytenko V.S. *Upravleniye gornym davleniyem pri burenii skvazhin* [Management of mountain pressure during drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 181 p.
- Dyuzhikov O.A., Distler V.V., Strunin B.M., Mkrtnyan A.K., Sherman M.L., Sluzhenikin S.F., Lurye A.M. *Geologiya i rudonosnost Noril'skogo rayona* [Geology and ore-bearing of Norilsk region]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 279 p.
- Golodkovskaya G.A., Shaumyan L.V., Balashaytis E.S., Kurinov M.B., Kovalko V.V., Rummyantseva N.A., Utkina I.A., Shirokov V.N. *Inzhenerno-geologicheskoye usloviya mestorozhdeniy sulfidnykh medno-nikelevykh rud Talnakhskogo rudnogo uzla v polyakh rudnikov Skalisty i Gluboky* [Engineering and geological conditions of sulfide copper and nickel ores of Talnakhskoe deposits in the fields of «Skalisty» and «Gluboky»]. Moscow, MSU Publ., 1967. 561 p.
- Dodin D.A., Batuev B.N. *Geologiya i petrologiya talnakhskikh differentsirovannykh intruziy i ikh metamorficheskogo oreola* [Geology and petrology of Talnakh differentiated intrusions and their metamorphic aureole]. *Petrologiya i rudnost talnakhskikh i noril'skikh differentsirovannykh intruziy* [Petrology and ore-bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions]. Leningrad, Nedra Publ., 1971. pp. 31–101.
- Nikiforov A.I., Sadovnikov R.V., Nikiforov G.A. *O perenose dispersnykh chastits dvukhfaznym filtratsionnym potokom* [Transfer of dispersed particles by two-phase filtration flow]. *Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 47–53.
- Ishbaev G.G., Dilmiev R.R., Khristenko A.V., Mileyko A.A. *Teoriya podbora fraktsionnogo sostava kolmatanta* [Theories of selection of colmatant fractional composition]. *Burenie & neft*, 2011, no. 6, pp. 16–18.
- Korneev V.I., Danilov V.V. *Zhidkoye i rastvorimoye steklo* [Liquid and water-glass]. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1996. 216 p.

Received: 29 June 2015.

УДК 622.24.053:531.5

АНАЛИЗ И НАУЧНОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО СПОСОБА БУРЕНИЯ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Шадрина Анастасия Викторовна,

канд. техн. наук, доцент каф. транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: avshadrina@rambler.ru

Саруев Лев Алексеевич,

д-р техн. наук, профессор каф. теоретической и прикладной механики Института физики высоких технологий Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: saruev@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования технологии и техники геологоразведочных работ, связанного с обеспечением энерго- и ресурсоэффективности процессов бурения.

Цель работы: научный обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований в области ударно-вращательного способа бурения, направленный на выяснение перспектив возможности разработки и применения ресурсоэффективной технологии бурения геологоразведочных скважин малого диаметра из подземных горных выработок, основанной на использовании генератора волн деформаций, передаваемых по бурильной колонне. Для повышения скорости бурения скважин в твердых породах созданы мощные ударные механизмы. Однако повышение энергии удара ограничивается прочностью бурового инструмента. При неизменном диаметре скважин увеличенную ударную мощность приходится передавать по бурильным трубам и их соединениям прежних размеров. Именно эти элементы бурильной колонны стали сдерживающим фактором внедрения новой технологии. В связи с этим весьма актуальным становится проведение анализа и научное обобщение результатов исследований для решения указанной проблемы.

Методы исследования: теоретический анализ; обширный обзор научной литературы по вопросам формирования ударных импульсов, передачи волн деформаций по бурильной колонне, разрушения горных пород, выбора рациональных режимов ударно-вращательного способа бурения, оптимизации процесса бурения на этапе, предшествующем технологическому процессу, выбора методов расчета систем ударно-вращательного способа бурения скважин, моделирования рабочих процессов, определения энергетических параметров буровых агрегатов, а также сопоставление результатов независимых исследований.

Результаты. Приведены современные представления и достижения в области ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра. Выявлены причины существенного расхождения результатов исследований у различных авторов. Показана целесообразность проведения конкретных исследований, которые позволяют добиться наиболее эффективных результатов при совершенствовании технологии и техники бурения скважин. Определены основные направления исследований технологических процессов и техники бурения, и сформулированы научно обоснованные рекомендации по повышению производительности бурения благодаря интенсификации процесса разрушения горных пород при бурении скважин.

Ключевые слова:

Геологоразведочное бурение, технология бурения, подземная горная выработка, бурильная колонна, формирование ударных импульсов, передача волн деформаций, разрушение горной породы, оптимизация бурения, моделирование рабочих процессов, энергетические параметры буровых агрегатов.

Введение

Одним из основных требований к производственным процессам является их ресурсоэффективность.

Известно, что в разведочном бурении одним из важнейших вопросов является качество извлекаемых из недр образцов горной породы. Очевидно, самым распространенным способом получения такой информации является разведочное колонковое бурение.

Однако стоит отметить, что и бурение, дающее образцы в виде шлама, например бурение с обратной циркуляцией воздуха, достаточно распространено, особенно в зарубежных странах (рис. 1).

Традиционно для интенсификации бурения при проходке скважин в твердых породах применяют погружные пневматические и гидравлические ударные машины.

Результаты исследований, проводимые в Томском политехническом университете И.А. Ней-

штетером [2], С.С. Сулакшиным, В.П. Рожковым и др. [3], показали, что воздействие на породоразрушающий инструмент (ПРИ) ударного импульса при вращательном бурении горных пород позволяет увеличить механическую скорость бурения от полутора до пяти раз.

Анализ геологоразведочного оборудования показал, что предлагаемые установки с погружными ударными механизмами в преобладающей своей части позволяют бурить скважины средних и больших диаметров.

Применение буровых установок с ударными механизмами, расположенными вне скважины, и независимым вращением бурильной колонны может являться альтернативным вариантом бурения сравнительно неглубоких геологоразведочных скважин (до 50 м) малого диаметра (40–70 мм) на месторождениях с хорошо изученными геологическими разрезами (условия залегания, физико-химические свойства полезных ископаемых и гор-

ных пород, мощность отложений и т. п.) и при бурении по «пустым породам» как более экономичный и быстрый способ углубки до рудного тела; при бурении с отбором шлама для его последующего анализа при эксплуатационной разведке этажей, горизонтов, блоков с целью уточнения данных для планирования добычи, контроля за качеством отработки запасов полезного ископаемого.

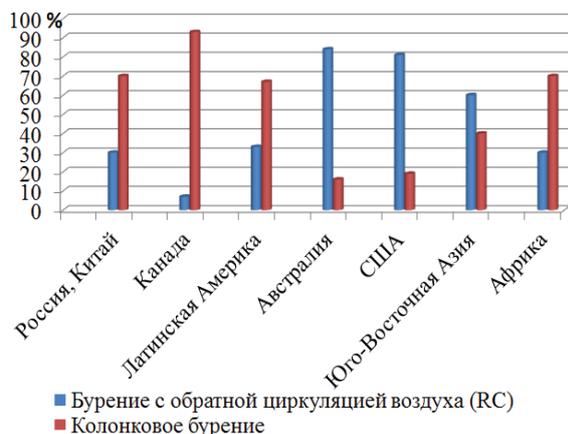


Рис. 1. Соотношение бурения с RC (обратной циркуляцией воздуха) и колонкового (данные национальной статистики по общим затратам на разведку с поверхности и из подземных горных выработок) [1]

Fig. 1. Ratio of RC (reverse circulation) drilling and core drilling (the data of national statistics on general costs for surface prospecting and from underground digging) [1]

Рассматривая технологию бурения скважин как широкий комплекс способов, приемов и средств бурения в соответствии с их назначением [4], следует выделить основные факторы, определяющие возможные пути и следствия сбережения ресурсов при ее применении (рис. 2).

Анализ современного геологоразведочного оборудования

В области геологоразведочного бурения возможность приложения ударной нагрузки на ПРИ предусмотрена посредством применения погружных пневмо- и гидроударников, которые в настоящее время представлены на рынке бурового оборудования следующими моделями:

- пневмоударные буровые комплексы серии ПН для сооружения скважин различного назначения диаметром 76, 93, 112, 132 мм с отбором и без отбора керна в породах VI–XII категорий по буримости (диапазон изменения энергии удара от 80 до 440 Дж) (ОАО «Тулское НИГП», г. Тула) [5];
- кольцевые пневмоударники ПКР-130, ПКР-150, ПКР-190 с энергией единичного удара от 150, 200 и 300 Дж, соответственно (СКБ «Геотехника», г. Москва и ИГД СО РАН, г. Новосибирск);
- зарубежные образцы погружных пневмоударных машин: Permon VKP 100 (Чехия), для ударно-вращательного бурения скважин диа-

метром от 100 до 110 мм в горных породах с коэффициентом крепости по Протоdjяконову от 6 до 20 (в т. ч. при геологоразведочных работах); «Sandvik» – Mission 30 (диаметры коронок от 90 до 105 мм); «Atlas Copco» – COP 34 (диапазон бурения от 90 до 110 мм), COP 44 (диапазон бурения от 110 до 130 мм); «Rockmore International» (Австрия/США) – серия ROK: ROK 2LT (диаметры коронок от 70 до 76 мм), ROK 350–006 Sonic Flow (диаметры коронок от 95 до 105 мм) и др.; а также погружные пневмоударники фирм-производителей Bolher (Австрия), Holman (Великобритания) и др.;

- разработанные в СКБ «Геотехника» унифицированные гидроударные машины Г-59 и Г-76 для бурения горных пород VII–XII категорий по буримости твердосплавными и алмазными коронками диаметром 59 и 76 мм (диапазон изменения энергии удара от 10 до 80 Дж) [6];
- зарубежные образцы погружных гидроударных машин: «Wassara» (Швеция) – энергия единичного удара от 350 до 400 Дж (наружный диаметр 96 мм); «IET» (Китай) – энергия единичного удара от 150 до 350 Дж (наружный диаметр 146 мм и др.).

Для эффективного бурения скважин малого диаметра предпринимаются попытки разработать малогабаритные погружные пневмоударные машины: АШ45 (ИГД СО РАН, г. Новосибирск) [7], ПП65 [8]. Такие пневмоударники требуют увеличения давления сжатого воздуха, в том числе и путем установки дополнительных компрессоров, а также увеличения мощности пневмоударника за счет более совершенных конструкций. Однако в настоящее время эти разработки не получили промышленного применения.

Таким образом, буровые агрегаты ударно-вращательного действия с ударными механизмами, расположенными вне скважины, позволяют проводить скважины малого диаметра из подземных горных выработок, используя большие мощности и обеспечивая существенное повышение скорости бурения. В табл. 1 в качестве примера приведены основные характеристики таких агрегатов.

Научное обобщение и анализ достижений в области ударно-вращательного бурения скважин из подземных горных выработок

Вторая половина XX в. характеризовалась значительным ростом теоретических и экспериментальных исследований в области применения технологий, в которых используется энергия удара при бурении скважин.

Отечественные и зарубежные исследователи сформировали следующие направления в этой области:

- 1) аналитические исследования;
- 2) экспериментальные исследования с выводом эмпирических формул и зависимостей;
- 3) определение взаимосвязей между свойствами горных пород и эффективностью их разрушения;

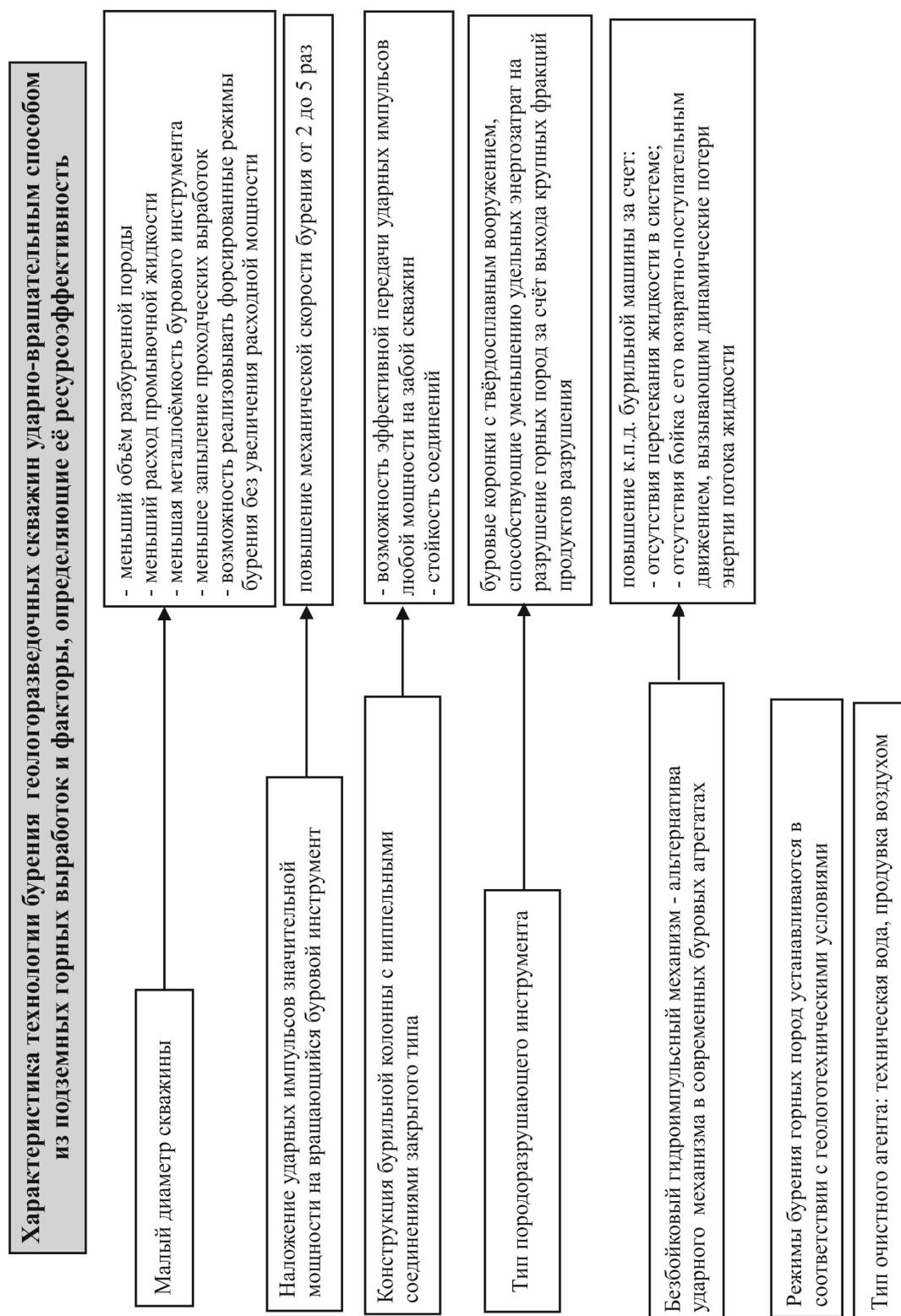


Рис. 2. Факторы, определяющие ресурсоэффективность технологии бурения геологоразведочных скважин ударно-вращательным способом

Fig. 2. Factors, determining resource efficient technologies in impact-rotary drilling of exploration wells

Таблица 1. Основные характеристики некоторых современных отечественных и зарубежных буровых агрегатов ударно-вращательного действия для бурения скважин из подземных горных выработок

Table 1. Basic parameters of some modern domestic and foreign impact-rotary drilling units for underground digging

Показатели/Indices	Техническая характеристика некоторых отечественных и зарубежных моделей буровых агрегатов ударно-вращательного действия Performance of some domestic and foreign models of impact-rotary drilling units						
	Наименование/Title			БУ-80НБ	Simba M3C	DrillMaster 100	DL331-5
Глубина бурения, м Drilling depth, m				40	51	50	23
Диаметр скважины, мм Well diameter, mm				52-85	51-89	64-89	51-64
Направление бурения Direction of drilling				Круговой веер в вертикальной плоскости Circular fan in a vertical plane	Бурение кольцевых, веерных и параллельных скважин на расстоянии до 1,5 м без переездов Drilling circular, fan and parallel wells within 1,5 m without moving	Бурение кольцевых, веерных и параллельных скважин Drilling circular, fan and parallel wells	
Тип перфоратора Type of perforator				M2 M3 M4	COP 1838ME	HC 109	HLX5
Осевая нагрузка на буровой инструмент, кН Axial load on a drilling tool, kN				до (to) 13	20	до (to) 15	20
Крутящий момент, Н·м Rotative moment, N·m				294	до (to) 640	от (from) 325 до (to) 415	до (to) 1355
Энергия единичного удара, Дж Single beat energy, J	132	167	260				400
Частота ударов, с ⁻¹ Impact frequency, s ⁻¹	42	37	37				42-52
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	80-130			от (from) 0 до (to) 340		от (from) 195 до (to) 250	250
Ударная мощность, кВт, не менее Impact power, kW, not less	5,5	5,5	7,5	20		13	20
Рабочее давление сжатого воздуха (гидросистемы), МПа Operation pressure of compressed air (hydraulic system), МПа	0,5			до 23		от (from) 8,5 до (to) 14	от (from) 10 до (to) 17
Фирма-производитель Producing company	Старооскольский механический завод (Россия)			Atlas Copco (Швеция)		RDH (Канада)/перфоратор – Montabert (Франция)	Sandvik (Швеция)

4) теоретические решения и моделирование процессов, основанные на определенной идеализации горной породы, ПРИ и механизмов их взаимодействия.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований руководствуются следующим:

- при математическом представлении результатов исследований основываются на физической сущности явления;
- при выводе формул допускают некоторые упрощения для возможности их применения в инженерных расчетах;
- результаты расчетов по формулам должны совпадать с экспериментальными данными.

Прежде всего, актуальным являлось исследование и установление зависимости механической скорости бурения от режимов работы буровых агрегатов (осевой нагрузки; крутящего момента;

скорости вращения бурильной колонны; предупредительной скорости боя; энергии, амплитуды и длительности ударного импульса; количества агента для очистки забоя; давления сжатого воздуха и т. п.) и геометрических параметров ПРИ, а также оценка энергоёмкости процесса разрушения горной породы с учетом влияния различных факторов.

Для буровых машин, имеющих ударный и вращательный механизмы, расположенные вне скважины, процессы формирования, передачи ударных импульсов силы по бурильной колонне, внедрение под их воздействием ПРИ в горную породу разделены во времени, т. е. протекают последовательно. Значительное число ученых исследовали данные процессы в поисках возможностей управления параметрами волн деформаций, что в конечном итоге способствовало повышению эффективности бурения твердых горных пород.

По данной проблеме накоплен достаточно большой теоретический и экспериментальный материал. В годы перестройки из-за сложившейся экономической ситуации в стране объем исследований по данным направлениям резко снизился, однако в настоящее время на основе многочисленных предшествующих исследований, имеющих огромную значимость, ведется научная работа применительно к современным требованиям технологии бурения.

Формирование ударных импульсов

Как известно, основные параметры волны деформации, генерируемой в результате приложения удара (форма, амплитуда, длительность, энергия) существенно влияют на характер разрушения горной породы.

Целый ряд исследований показал возможность регулирования процессов преобразования энергии при работе ударных механизмов [9–15].

Обобщая теоретический и экспериментальный опыт в вопросах генерирования ударных импульсов рациональной формы, можно выделить следующие направления:

- формирование ударных импульсов в ударных системах различной конструкции [10–13];
- формирование ударных импульсов ударными механизмами с использованием жидкости (масла, воды), а также твердого тела в качестве промежуточного элемента [14];
- формирование ударных импульсов в ударных системах с элементами из различных материалов (сталь, сплав титана, сплав алюминия [9]).

Основной целью подобных исследований является определение условий формирования ударных импульсов оптимальной формы, приводящей к эффективному разрушению горной породы.

Форма ударного импульса должна соответствовать силам сопротивления среды внедрению ПРИ во времени. Чем больше это соответствие, тем меньше доля отраженной энергии, и, соответственно, меньше ее потери. Длина бойка, его диаметр и масса, а также скорость приложения ударной нагрузки должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить их большее взаимное соответствие. Если усилие, развиваемое импульсом, превосходит величину, необходимую для внедрения, то ПРИ легко внедряется в разрушаемую среду. При этом происходит отражение импульса растяжения. Нереализованная энергия удара расходуется на переизмельчение шлама, а возвращаемая в ударный механизм повышает шум и вибрацию. Если величина усилия импульса недостаточна для внедрения бурового инструмента, то отражается импульс сжатия. Таким образом, нерациональное использование энергии волны деформации приводит к повышению энергоемкости разрушения горных пород.

В реальных условиях, как правило, отражается часть ударного импульса.

В работах Л.Т. Дворникова, А.А. Мясникова [13, 15] обоснована модель сопротивления породы внедрению инструмента, а также определены формы продольных колебаний, оптимально переходящих в работу разрушения горной породы по критерию минимума энергии отраженной волны деформации. Оптимальным авторами считают импульс, определяемый формой, обеспечивающей минимум энергии отраженному импульсу при заданной зависимости «сила–внедрение» и заданном значении энергии сформированного (падающего) импульса.

Кроме того, автором разработана конструкция бойка ударного механизма, имеющая форму гиперболоида вращения, генерирующая оптимальные по форме ударные импульсы и обеспечивающая существенное повышение производительности без увеличения подводимой к механизму мощности [13].

Идеи предыдущих авторов получили развитие в работах других исследователей [11, 14, 16, 17]. В трудах [11, 16] представлены решения задач, связанных с созданием и совершенствованием машин, предназначенных для разрушения хрупкой среды ударом в отсутствие поворота инструмента. Обоснованы и предложены конструкции бойков с рациональной конфигурацией в виде катеноидов для ударных механизмов, защищенные патентами РФ. Сравнительный анализ импульсов, формируемых различными ударниками, выявил, что бойки полукатеноидальной формы генерируют в волноводе импульс, приближенный к ударному импульсу оптимальной формы. В основе исследований лежит модифицированная волновая теория удара, рассматривающая трехмерное распространение волн в упругой среде и учитывающая геометрию деталей ударных механизмов [11].

В работе [17] обоснована и представлена конструктивная схема ударного механизма с генератором ударных импульсов, адаптирующегося к разрушаемой среде. Отмечается необходимость увеличения длительности ударного импульса для повышения эффективности удара, так как за короткое время контакта при ударе ударная нагрузка не успевает реализоваться в горной породе. Использование при этом гидропривода позволяет получить высокий к.п.д., увеличение долговечности оборудования и производительности разрушения горной породы, обеспечивает повышенные технико-экономические показатели бурения. Данная задача решалась путем математического моделирования. Разработанная математическая модель позволяет ускорить разработку опытного образца ударного механизма, близкого к исходным техническим требованиям.

В настоящее время в ударных механизмах, как правило, применяются цилиндрические или ступенчато-цилиндрические элементы, которые перемещаются и соударяются только в осевом направлении. Для обеспечения центрального удара один

из контактирующих торцов выполняется в виде сферического сегмента, а второй – плоским [18]. В работе Г.В. Топорова и М.Я. Левандовского рекомендован радиус закругления ударных торцов цилиндрических бойков 300 мм [19].

Следует отметить еще один важный момент в вопросе формирования ударных импульсов, связанный с развитием гидроударных систем [14, 17, 20]. Данное направление является более прогрессивным в развитии буровой техники и связано со значительно превосходящим к.п.д. буровых установок по сравнению с пневматическими.

Тем не менее, несмотря на то, что накоплен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований в данном вопросе, до настоящего времени нет серийного выпуска отечественных гидравлических ударных машин, соответствующих лучшим зарубежным образцам [20]. Существующие зарубежные и отечественные образцы гидравлических буровых установок включают боек и реализуют механический удар. В работе [21] рассматривается представление об управлении амплитудой и длительностью ударных импульсов на основе введения в структуру механизмов ударного действия промежуточного жидкостного элемента. Это позволяет увеличить технический ресурс бурового инструмента за счет формирования ударных импульсов рациональной формы и снижения напряжений; увеличить частоту удара в 2 раза; исключить волны изгиба; снизить уровень шума; передавать большие энергии удара; защитить от отраженных ударных импульсов детали буровой машины.

В работах А.С. Сердечного [21] и В.П. Рындина [14] установлено, что при соударении через слой жидкости исключаются высокочастотные составляющие сглаженного ударного импульса. Это способствует уменьшению шума от вибрации бурового инструмента.

По нашему мнению, перспективной для бурения скважин может стать разработка безбойковой гидроимпульсной системы, позволяющей формировать импульсы давления со сглаженным передним фронтом, т. е. осуществляющей плавное нагружение бурового снаряда [22].

Таблица 2. Плотности материалов бойка ударного механизма и волновода (бурильной колонны)

Table 2. Density of the materials of percussive mechanism head and waveguide (drilling stem)

Материал/Material	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³
Сталь/Steel	7800
Сплав титана/Titanium alloy	4400
Сплав алюминия/Aluminum alloy	2600

Влияние акустических свойств материалов ударной системы на параметры формируемых импульсов установлено в работе [9]. Указанные свойства материала бойков и бурильных труб опреде-

ляются декрементом затухания, а также скоростью распространения волн. Для стали, сплава титана и сплава алюминия скорость распространения ударных импульсов была принята авторами одинаковой и равной 5100 м/с с погрешностью 3 %, а удельное акустическое сопротивление, определяемое произведением скорости звука в среде на ее плотность ($\rho_i \cdot a_i$), пропорционально плотности (табл. 2).

Для указанных трех материалов авторы [9] рассмотрели девять вариантов ударных систем с различным сочетанием материалов бойка и волновода и выявили закономерности генерирования волн деформаций в них:

- 1) при неизменной энергии удара и геометрических параметрах системы (площадь поперечного сечения бойка больше площади поперечного сечения волновода) с уменьшением акустического сопротивления (плотности) материала бойка амплитуда силы импульса в волноводе возрастает, а длительность головной части ударного импульса, содержащей около 98 % начальной энергии удара, уменьшается. В свою очередь, уменьшение акустического сопротивления материала волновода приводит к снижению амплитуды силы импульса, но возрастанию его длительности;
- 2) уменьшение акустического сопротивления волновода приводит к снижению напряжений в волне деформаций и увеличению длительности этой волны. Например, с уменьшением акустического сопротивления волновода в 3 раза и значениях отношений площадей поперечного сечения бойка S_1 к площади поперечного сечения волновода S_2 в диапазоне от 2 до 6 напряжения в волне деформации уменьшаются в 2,5–3 раза, а длительность волны возрастает в 3 раза;
- 3) если боек и волновод выполнены из одного материала, то уменьшение акустического сопротивления материала приводит к снижению напряжений, возникающих в волноводе, без изменения длительности генерируемой в нем волны деформации.

Очевидно, что выбор параметров ударной системы необходимо производить, учитывая прочностные качества материалов, а также из условий наилучшей передачи энергии волны деформации к разрушаемой горной породе.

В дальнейшем исследования ударных систем, включающих элементы с разной акустической жесткостью, были продолжены в работе [14] и направлены на использование возможности фильтрации отраженных сжатием ударных импульсов, направленных по бурильной колонне к буровому агрегату и приводящих к ее разрушению.

Передача волн деформаций по бурильной колонне

Е.В. Александров и др. [23] доказали, что передача удара имеет сложный характер и осуществляется вследствие взаимодействия масс и волновых

Таблица 3. Известные формулы для определения коэффициента передачи энергии удара η
Table 3. Known formulas to determine impact energy transfer coefficient η

Автор/Author	Формула/Formula	Примечание/Note
Ю.В. Беляев [26, 27] Yu.V. Belyaev [26, 27]	$\eta = \frac{m_1}{m_2} [1 - f + \alpha(1 - f)f]^2$, где $f = \frac{a_2 - ka_1}{a_2 + ka_1}$, $k = \frac{E_2 S_2}{E_1 S_1}$ (is the integral in the expression) $\frac{T_2}{T_1} = p + \alpha$.	Индексы 1 и 2 относятся к бойку и ударяемому стержню соответственно. Под стержнем понимается буровой инструмент, воспринимающий ударную нагрузку Indices 1 and 2 refer to a head and a rod, respectively. The rod is regarded as a drilling unit taking up impact stress m_1 и m_2 – массы стержней; a – скорость распространения звуковых волн в материале стержней; α – декремент затухания ($0 < \alpha < 1$); E и S – модуль упругости материала и площадь поперечного сечения стержней, соответственно; T – время движения волн при соударении m_1 and m_2 are the rod mass; a is the velocity of sound wave propagation in rod material; α is the damping ratio ($0 < \alpha < 1$); E and S are the material elasticity module and rod cross-section area, respectively; T is the time of wave motion at impacting
П.С. Кучеров [26, 28] P.S. Kucherov [26, 28]	$\eta = 1 - (1 - c^2) \frac{k}{1 + k}$, где c – коэффициент восстановления при ударе (coefficient of elasticity); $k = \frac{m_2}{m_1}$. Так, например, для удара стали о сталь $c \approx 0,56$ (for steel-on-steel impact), тогда $\eta = 1 - 0,7 \frac{k}{1 + k}$.	Предполагается, что передается вся кинетическая энергия бояка за вычетом энергии, идущей на неупругие деформации при ударе It is supposed that the whole kinetic energy of a head except the energy for inelastic deformation at impact is transferred
Б.И. Бокий [26] B.I. Boky [26]	$\eta = \eta_1 \eta_2$, где $\eta_1 = (1 + c)^2 \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2}$; $0,5 < \eta_2 < 0,7$	η_1 – коэффициент передачи удара от ударника к стержню; η_2 – коэффициент использования энергии непосредственно на разрушение горной породы; c – коэффициент восстановления скорости при ударе ($0 < c < 1$); Q – вес ударника и стержня. Автор считает, что общий к.п.д. удара при бурении нельзя принимать более 0,05–0,07, что кажется нам весьма заниженным значением η_1 is the coefficient of impact transmission from a tester to a rod; η_2 is the coefficient of energy use directly for rock destruction; c is the coefficient of rate recovery at impact ($0 < c < 1$); Q is the weight of a tester and a rod. The author considers that impact total efficiency could not be taken more than 0,05–0,07 when drilling. But the author's of this paper suppose it is rather underestimated value
И.А. Афанасьев [27] I.A. Afanasyev [27]	$\eta = \frac{m_1 m_2 (1 + c_1)^2 (1 - c_2)^2}{(m_1 + m_2)^2}$, где m_1 и m_2 – массы бойка и стержня (mass of a head and a rod); c_1 – коэффициент восстановления скорости при ударе бойка по стержню (coefficient of rate recovery at head-on-rod impact); c_2 – коэффициент восстановления скорости при ударе стержня по горной породе (coefficient of rate recovery at rod-on-rock impact)	Автор определяет общий к.п.д. удара как произведение двух коэффициентов: к.п.д. удара по стержню и к.п.д. удара стержня по породе The author determines the total efficiency as a product of two coefficients: efficiency of impact with rod and efficiency of rod impact with a rock
В.М. Мостков [27, 29] V.M. Mostkov [27, 29]	$\eta_2 = \frac{A_1}{A}$, где A_1 – полезная работа, совершаемая стержнем при внедрении в породу (effective capacity of a rod at penetration); $A = \frac{k}{\varepsilon} [2 \cdot T^{\mu} (1 - T^{\mu})]^2 \frac{m_0 V_0^2}{2}$; A – кинетическая энергия бойка перед ударом (kinetic energy of a head before impact); $A = \frac{m V_0^2}{2}$; где $\mu = \frac{Q_{ст}}{2Q_0}$ – отношение веса стержня к удвоенному весу бойка (ratio of a rod weight to double weight of a head); $\varepsilon = \frac{r_0 \omega_0^2}{2 E \omega_0}$, где r_0 – коэффициент внедрения (penetration coefficient);	Автор считает, что потери энергии при ударе происходят только между стержнем и породой; к.п.д. удара η_2 не зависит от скорости поршня в момент удара. Общий к.п.д. η определяется как произведение к.п.д. собственно бурового агрегата η_1 и к.п.д. удара стержня при внедрении в горную породу The author considers that energy losses at impact occurs only between the rod and the rock; impact efficiency η_2 does not depend on piston velocity at impact. Total efficiency η is determined as the product of the drilling unit efficiency η_1 and rod impact efficiency at penetration

Автор/Author	Формула/Formula	Примечание/Note
А.Г. Цуканов [30] A.G. Tsukanov [30]	$\eta = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{-2m_2}{1-l} \right)^2$, где m_1 и m_2 – массы бойка и стержня соответственно (mass of a head and a rod, respectively); l – длина волновода (waveguide length)	Индексы 1 и 2 относятся к бойку и ударяемому стержню соответственно. Под стержнем понимается буровой инструмент, воспринимающий ударную нагрузку Indices 1 and 2 refer to a head and a rod, respectively. The rod is regarded as a drilling unit taking up impact stress
К.И. Иванов и др. [12] K.I. Ivanov et al. [12]	$\eta = \frac{4c_0c_2}{(c_0 + c_2)^2} \left[\sum_0^T \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 dt + \int_0^T \left(\frac{N_{in}}{N_0} \right)^2 dt \right]$, где T – период прохождения импульса энергии по всей длине ударника (period of energy pulse propagation over the tester length); N_0 – подведенная к буровому агрегату мощность (power delivered to a drilling unit); N – полезная мощность бурового агрегата до внедрения стержня в горную породу (effective capacity of a drilling unit before rod penetration)	Формула позволяет определять коэффициент передачи энергии удара по длинным стержням The formula allows determining the coefficient of energy transfer along the long rods
К.И. Иванов и др. [12] K.I. Ivanov et al. [12]	$\eta = \frac{A_2}{A_0} \frac{4c_0c_2}{(c_0 + c_2)^2}$, где A_2 – энергия, полученная стержнем за время соударения (energy obtained by the rod during impacting); A_0 – энергия ударника перед соударением (energy of a tester before impacting); c – жесткости ($c=S\rho a$) ударника и стержня (tester and rod stiffness); при (at) $c_0=c_2$ возможна полная передача энергии (complete energy delivery is possible); $\eta = \frac{4c_0c_2}{(c_0 + c_2)^2} \frac{1}{T} \left[\sum_0^T \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 dt + \int_0^T \left(\frac{N_{in}}{N_0} \right)^2 dt \right]$, где T – период прохождения импульса энергии по всей длине ударника (period of energy pulse propagation over the tester length); N_0 – подведенная к буровому агрегату мощность (power delivered to a drilling unit); N – полезная мощность бурового агрегата до внедрения стержня в горную породу (effective capacity of a drilling unit before rod penetration)	Предложена методика определения потери амплитуды напряжения и энергии удара при распространении по колонне стержней The authors proposed the technique for determining the stress amplitude and impact energy loss at propagation along the rod column
Лаборатория удара и вибрации ИГД им. А.А. Скочинского [31] A.A. Skochinsky laboratory of impact and vibration IGD [31]	$\eta = \frac{(1+k)^2 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}$, m_1 и m_2 – массы бойка и стержня, соответственно (mass of a head and a rod, respectively)	Коэффициент передачи энергии удара может быть определен для нескольких случаев соударения: а) случай плоского удара ударника о бесконечный стержень (или $\frac{l_2}{a_2} > \frac{l_1}{a_1}$, когда отраженная волна не сможет оказать влияние на следующий удар); б) неплоский удар двух стержней Coefficient of impact energy transfer may be determined for some cases of impacting: а) case of a tester-flat impact with an infinite rod (or $\frac{l_2}{a_2} > \frac{l_1}{a_1}$, when the reflected wave could not influence the next impact); б) non-flat impact of two rods
П.М. Алабужев и др. [32] P.M. Alabuzhev et al. [32]		Применяется формула классической механики, предполагается, что коэффициент восстановления скорости (отскока) k – величина переменная The authors apply the formula of classical mechanics and suppose that the coefficient of rate recovery (rebound) k is the variable value

процессов, возникающих при соударении, зависит от формы соударяемых тел и степени податливости торцов. Кроме того, с увеличением глубины скважины требуется увеличение крутящего момента на буровом инструменте.

В литературе недостаточно подробно представлены результаты экспериментальных исследований передачи энергии удара по относительно длинным колоннам буровых труб (50 м и более).

В процессе движения волны деформации по буровой колонне возможна потеря ее энергии, вызванная различными факторами. Одним из главных факторов, обуславливающих эффективность бурения, реализующего энергию удара, является коэффициент передачи энергии удара [24, 25].

К настоящему времени существует несколько методов определения коэффициента передачи энергии удара η (табл. 3).

Таким образом, труды значительного количества ученых были посвящены поискам путей и решений передачи энергии удара по буровому инструменту с наименьшими потерями. Однако существенный разброс численных значений полученных результатов требует проведения дополнительных исследований с целью получения объективной оценки. При этом одним из принципиальных факторов может быть унификация условий проведения экспериментов.

Разрушение горной породы

При исследовании разрушения горных пород внимание ученых было направлено на изучение механизма разрушения горной породы, ПРИ, а также энергоёмкости разрушения горной породы [29, 33–36].

Систематизация и анализ описаний механизма разрушения горной породы при вращательно-ударном бурении разных исследователей (Е.Ф. Эпштейна, Ф. Патцольда, Е. Иннета, Е.П. Пфлейдера и В.Д. Лакабанне, О.Д. Алимова, А.И. Мелекесцева, Ю.М. Парийского, Ихара Макоото, Б.З. Израэлит) приведены в работе Л.Т. Дворникова [15]. Механизм разрушения забоя при вращательно-ударном бурении представляется следующим (рис. 3) [15]:

- 1) лезвие коронки в результате действия ударной нагрузки мгновенно заглубляется на некоторую величину h_y (положение 1);
- 2) инерционность подающего механизма буровой машины вызывает снижение осевого прижатия ПРИ к забою, лезвие коронки несколько отходит от уровня первоначального заглубления, перемещается в положение 2;
- 3) осевая нагрузка достигает максимального значения, и в положении 2 лезвие коронки перед слоем горной породы, который необходимо срезать, замедлит свое движение или остановится;
- 4) по мере формирования и дальнейшего увеличения в системе «вращательно-ударный механизм – штанга – коронка» крутящего момента, необходимого для скола горной породы, лезвие

коронки внедряется в забой (положение 3) на величину h_1 , меньшую h_y ; под действием крутящего момента происходит скол горной породы по линии a ;

- 5) лезвие коронки, сменяя частицы горной породы, за счет упругих деформаций штанги переместится в положение 4; вновь может произойти внедрение на h_1 (положение 5), скол по линии b и перемещение лезвия в положение 6;
- 6) этот процесс может происходить многократно (положения 7, 8) до следующего внедрения коронки от удара на h_y (положение 9).

Данный процесс может видоизменяться в зависимости от величины осевой нагрузки, угла поворота между ударами и энергии удара.



Рис. 3. Механизм разрушения горной породы при вращательно-ударном бурении [15]

Fig. 3. Mechanism of rock destruction at rotary-impact drilling [15]

На первом этапе исследований механизм разрушения горных пород изучался на упрощенных конструкциях инденторов: острое и притупленное лезвие, плоский штамп, сфера для целей изучения процесса формирования угловой части забоя. В дальнейшем исследования проводились при бурении как известными коронками, имеющими классическое радиальное расположение лезвий, так и новыми, с иной геометрией рабочих лезвий, главным образом для исследования износа инструмента, сопоставление его по энергоёмкости разрушения горной породы.

Так, в работе И.В. Куликова, В.Н. Воронова, И.И. Николаева [37] отмечается, что ширина лунок, формируемых острым и притупленным лезвиями, при прочих равных условиях остается примерно постоянной (площадка притупления имела ширину 4 мм), а длина в значительной степени зависит от формы лезвия. Длины острых лезвий и лунок разрушения ими практически равны, а притупленное лезвие образует лунку, длина которой превосходит длину лезвия на две ширины площадки притупления. Глубина внедрения острого лезвия мало отличается от глубины лунок разрушения. Глубина внедрения притупленного лезвия в 10–15 раз меньше глубины лунок разрушения, причем с увеличением энергии удара эта разница растет.

Важное внимание было уделено изучению различными методами (фотоупругости, скоростной киносъемки, тензометрии, поэтапного «заморажи-

вания», разрушения, методами конечных элементов) процесса трещинообразования в горной породе, как неизбежного следствия концентрации предельных напряжений в контактной зоне. Характер трещинообразования при разрушении горных пород индентором с острым лезвием состоит в образовании относительно глубоких трещин лишь в центре лунки вдоль ее длинной оси. В бортовых зонах трещины практически не наблюдаются. В то же время лунки разрушения, образованные притупленным индентором, образуют глубокие трещины. Вывод о том, что увеличение угла заострения лезвия инструмента приводит к незначительным размерам лунки выкола, но глубокой трещине подтверждается К.И. Ивановым и др. [12].

Высокоомощные буровые агрегаты ударно-вращательного действия обуславливают необходимость применения высокопрочного твердосплавного ПРИ [38]. Исследования в этом вопросе направлены на существенное повышение стойкости ПРИ путем поиска оптимальных значений для всей гаммы конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров коронок [39–41].

Большой научный и практический вклад в решение задач увеличения стойкости ПРИ внесли О.Д. Алимов, В.В. Бойков, В.И. Власюк, Л.Т. Дворников, В.И. Зайцев, С.А. Куклин, В.А. Латышев, Ю.А. Медовый, Э.М. Патрикеева, Н.Г. Петров, Н.С. Родионов, С.Я. Рябчиков, А.М. Чувилин, И.И. Яновский и др.

Обобщая результаты исследований, можно сформулировать следующие представления по данной проблеме:

- 1) при прочих равных условиях штыревые коронки типа КТШ позволяют ликвидировать возможные случаи заклинивания лезвий долотчатых коронок в забое; в то же время обеспечивают повышение скорости бурения по сравнению с крестовыми коронками из-за более высокой энергии удара на единицу длины лезвия [41];
- 2) для буровых машин малой мощности С.А. Куклиным [40] предложен вариант буровой коронки с линейным расположением цилиндросферических твердосплавных вставок, имеющих меньше концентраторов напряжений, механизм разрушения близкий к механизму действия коронок долотчатого типа (разрушение секторами), не вызывающий сильную отдачу и снижение скорости бурения, как в случае применения коронок западных образцов;
- 3) сравнительный анализ напряженного состояния инденторов сферической, баллистической, тороидальной и клиновидной форм ударной поверхности, воздействующих на горную породу, показал следующее [37, 40]:
 - инденторы лезвийного типа требуют наименьшее количество подводимой энергии и обладают наименьшей разрушающей способностью;
 - инденторы, имеющие ударную поверхность тороидальной формы могут воспринимать

наибольшую энергию удара и обладают наименьшей разрушающей способностью;

- инденторы со сферической контактной поверхностью являются переходной формой от лезвийных к тупым типа «тороид». Сравнительный анализ проведен методом конечных элементов в компьютерных программах фирмы «Ansys»;
- при малых энергиях удара эффективность разрушения горных пород острым лезвием выше эффективности разрушения притупленным индентором.

По результатам физического моделирования взаимодействия лезвия ПРИ и горной породы в работе [42] установлено, что напряжения, возникающие в твердой породе при заданной нагрузке, зависят от диаметра скважины, угла приострения ПРИ, затупления лезвия, а также удаленности контактной зоны от свободной поверхности, образованной предварительным сколом.

Анализ динамического взаимодействия индентора со сферами различных радиусов позволил установить, что при равных энергиях удара энергоемкость существенно зависит от радиуса сферы индентора: с увеличением последнего энергоемкость резко возрастает [43]. Авторы объясняют данное явление тем, что при большем радиусе сферы при равных нагрузках все зоны разрушения перекрыты поверхностью сферы.

Исследованиями особенностей воздействия на горную породу твердосплавных вставок различных форм, а также инденторов-эллипсоидов методом конечных элементов в Ansys занимался С.А. Куклин [37]. Подобная форма инденторов в отличие от осесимметричных позволяет создавать протяженную зону разрушения, подобную зоне разрушения лезвийных инденторов, но не создает столь высокой концентрации напряжений. Исследуя на основе численного эксперимента распределение напряжений в горной породе, инденторе, а также удельную работу разрушения при различных соотношениях осей эллипса (1; 0,75; 0,5; 0,25), автор приводит выводы о том, что [37]:

- картина распределения напряжений может существенно меняться для случаев внедрения в плоскую поверхность и в предварительно сформированную лунку;
- инденторы малой толщины более равномерно нагружены;
- максимальные напряжения в породе примерно одинаковы для всех форм инденторов;
- независимо от того, в какую поверхность внедряются инденторы (в плоскую или в предварительно сформированную лунку), по энергоемкости инденторы со сферической формой ударной поверхности не являются наиболее рациональными. Установлено, что в первом случае наиболее рационально применять инденторы с соотношением осей 0,4 (что связано с упругими свойствами среды и с наибольшими деформациями в горной породе, когда поперечный раз-

мер площадки контакта составляет 40 % от продольного размера). Во втором случае более рациональными будут инденторы с соотношением осей 0,6, т. е. при предварительно сформированной лунке.

Рациональные режимы ударно-вращательного способа бурения. Оптимизация процесса бурения на этапе, предшествующем технологическому процессу

В работе Л.И. Дворникова [15] проанализированы все доступные результаты отечественных и зарубежных исследований (более 125), на основе которых установлены основные закономерности процесса вращательно-ударного бурения шпуров. Главным образом исследовалось влияние на величину углубления бурового инструмента за оборот основных параметров процесса вращательно-ударного бурения: физико-механических свойств горных пород, осевой нагрузки, скорости вращения бурового инструмента, энергии единичного удара, частоты ударов, геометрических параметров и количества лезвий инструмента.

Обобщение полученных результатов приводит к следующим выводам:

- 1) одним из преимуществ вращательно-ударного способа бурения является возможность подвода к буровому инструменту больших мощностей;
- 2) установлены основные эмпирические зависимости и рациональные параметры процесса вращательно-ударного бурения в горных породах различной твердости:
 - осевая нагрузка до значений 12 кН практически не оказывает влияния на объем разрушения от ударов. Для горных пород с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову $f=16-18$ приложение осевой нагрузки практически не целесообразно и необходимо только для обеспечения контакта буровой коронки с забоем;
 - для горных пород с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову от 4 до 20 среднее число ударов за оборот буровой колонны заключено в интервале 10–50 уд./об. (при усредненном значении угла поворота лезвий инструмента 36–7°). Увеличение скорости вращения коронки приводит к снижению углубления ПРИ за оборот буровой колонны. При этом отмечается увеличение энергоемкости разрушения горной породы. Это обусловлено переизмельчением бурового шлама в случае числа ударов за оборот буровой колонны больше некоторого рационального значения или неэффективностью бурения при значении ударов за оборот меньших рационального значения, когда последующий удар наносится по участку забоя, не воспринявшему необходимое воздействие от предыдущего удара;
 - влияние энергии удара на объем разрушенной породы при бурении горных пород сред-

ней твердости не так существенно, как, например, при бурении гранита;

- меньшее число ударов за один оборот буровой колонны должно соответствовать менее твердым горным породам. Так, например, при бурении гранита с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову $f=14-16$ изменение угла поворота лезвий ПРИ с 45 до 5° приводит к увеличению углубления скважины за оборот с 1 до 7 мм, а также уменьшению объемной работы разрушения;

Сложная задача, связанная с поиском теоретических зависимостей между параметрами режима бурения и их практической реализацией представляет собой оптимизацию процесса бурения [44, 45]. Вопросами повышения технико-экономической эффективности бурения и оптимизацией приводов буровых станков занимались М.Г. Абрамсон, Э.А. Айзуппе, В.А. Акулов, М.А. Александров, О.Д. Алимов, Р.А. Бадалова, Г.А. Блинов, В.Д. Буткин, В.А. Бражников, Г.Д. Бревдо, Н.М. Бройтман, В.И. Брылин, В.Г. Владиславлев, Н.В. Волков, Л.А. Вуккерт, Р.Х. Гафиятуллин, Н.Е. Гарнер, Ю.В. Грабов, В.И. Дусев, А.А. Жуковский, С.Г. Калошин, А.С. Карачев, В.Г. Кардыш, Е.А. Козловский, Л.Ф. Куликовский, Б.Н. Кутузов, Н.И. Любимов, Д.Н. Маликов, И.Ф. Медведев, А.А. Минин, В.В. Нескоромных, А.В. Орлова, И.А. Остроушко, И.П. Петров, Ю.Ф. Потапова, В.М. Питерский, Б.М. Радицев, Б.М. Ребрик, С.Я. Рябчиков, А.П. Саммель, Н.Б. Ситников, Б.Ф. Скаф, В.И. Солод, Л.И. Старков, С.С. Сулакшин, Н.И. Терехов, А.В. Топчиев, А.Е. Троп, В.С. Федоров, М.А. Фингерит, В.Г. Храменков, К.А. Чефранов, Г.А. Шаумян, Н.И. Шацев, Р.Г. Шмидт, Л.А. Шрейнер, В.Ф. Щербинин, Р.М. Эйгелес, Е.Ф. Эпштейн и др.

Особое внимание авторов уделено:

- анализу и методам оценки экономической эффективности оптимальных режимов бурения, в частности рациональным областям применения различных способов бурения и оптимальных режимов;
- исследованиям зависимости производительности буровых агрегатов от различных технологических и конструктивных факторов, в которых основное внимание было направлено на достижение высоких скоростей бурения, а также к.п.д. буровых агрегатов.

Оптимизация любого процесса, в том числе и бурения, основывается на поиске и обосновании критериев оптимизации.

Как известно, оптимизация процесса бурения должна проходить в два этапа:

- 1) предшествует технологическому процессу бурения и направлен на выбор оборудования, бурового инструмента, обоснованию конструкции скважины;
- 2) оптимизация самого процесса бурения, основан на применении различных систем автоматиче-

ского управления процессом бурения, реализующих оптимальные параметры процесса по выбранному критерию.

Как отмечено в [44, 35], понятие оптимального решения может быть определено лишь с точки зрения конкретного критерия оптимальности. На основе этих критериев разработаны и внедрены различные типы приводов механизмов вращателя, ударного механизма, подачи бурового инструмента, лебедки.

Большая часть работ перечисленных выше исследователей направлена на разработку и развитие систем автоматического управления станками геологоразведочного бурения. В то же время выбор конструкции станков, в частности ударно-вращательного действия для бурения в условиях подземных рудников, производится довольно часто интуитивно, недостаточно обоснованно.

Методы расчета систем ударно-вращательного способа бурения скважин. Моделирование рабочих процессов

Ценным практическим результатом исследований процессов ударно-вращательного способа бурения является разработка метода расчета ударных систем «ударно-вращательный механизм – буровой снаряд – горная порода». Особое внимание уделяется как математическому, так и компьютерному моделированию процессов при продольном ударе. Математические модели, алгоритмы, программы и программные комплексы позволяют существенно облегчить и ускорить процессы моделирования и расчета систем, реализующих продольный удар.

Вопросы разработки методов расчета ударных систем для бурения скважин представлены в работах [9, 12, 46–53] и получили развитие в [11, 40, 54, 55].

Как правило, аналитические решения подобных задач представляют собой громоздкие формулы, а в некоторых случаях найти такое решение практически невозможно. Это обуславливает перспективность применения при расчетах численных методов, например графодинамического метода, представленного в работе [9]. Данный метод позволяет проводить расчеты ударных систем, включающих элементы сложной конфигурации. Анализ примера расчета ударных систем с бойками различной формы по предлагаемому методу показал, что в рассматриваемом интервале параметров бойков их длина в большей степени влияет на эффективность передачи энергии волны деформации в горной породе, по сравнению с формой.

В работе [52] приведен метод расчета формы ударного импульса и величины напряжения в буровом инструменте на основе графодинамического метода. Автор привел ряд наиболее часто встречающихся в практике бурения случаев представления импульсов напряжения: ударник равного со штангой поперечного сечения и акустической жесткостью; ударник с бóльшим поперечным сечением и акустической жесткостью, чем у штанги; ударник сложной конфигурации; конический ударник.

В работе [12] также на основе графодинамического метода приведен расчет формирования ударных импульсов и его распространения по буровому снаряду. Расчет сводится к определению величин силы, напряжения, а также энергии в элементах системы «ударник – хвостовик – буровая штанга». Элементы системы – стержни переменного сечения, а сама система представляет собой целое, не размыкается в процессе прохождения ударного импульса.

В работе [22] приведена методика определения максимальных напряжений в резьбовых соединениях труб в зависимости от энергетических параметров ударного механизма, величины крутящего момента и осевой нагрузки, создаваемых буровыми агрегатами.

В работе [55] математически представлено множество частных случаев расчета ударных систем.

Авторами работы [56] предложен метод расчета распространяющихся ударных импульсов по буровой колонне, позволяющий с относительной погрешностью, не превышающей 10 %, получить: коэффициенты прохождения и отражения ударного импульса в реальном буровом инструменте; частоту волны деформации, при которой в буровом снаряде появляются волны деформации, не способствующие его продольному перемещению, а значит и разрушению горной породы; значение продольного смещения бурового снаряда и продольной силы; энергию волны деформации, в т. ч. энергию, переносимую ее гармоническими составляющими.

С развитием компьютерных технологий исследователи получили возможность разрабатывать методы, уточняющие механизмы формирования и передачи ударных импульсов, как по буровому снаряду, так и в горную породу, реализовывать данные методы в программных продуктах.

Так, разработки, представленные в работе [37], позволяют повысить точность вычислений волновых процессов в стержневых неоднородных системах от 20 до 40 % за счет учета волновых состояний внутри каждого элемента, возникновения повторных ударов и т. п. Алгоритмы вычисления позволяют повысить в 2,5 раз производительность моделирования и анализа полученных результатов, а сами результаты – дать новые представления о состоянии стержней до и после нанесения продольного удара.

Кроме этого, в последнее время актуальными являются разработки, связанные с исследованиями взаимодействия ПРИ различного типа с разрушаемой горной породой, механизма разрушения на основе метода конечных элементов, реализованном в компьютерных программах фирмы «Ansys», «Abaqus».

В работах С.А. Куклина [37, 40] приводятся результаты исследований особенностей воздействия на горную породу безлезвийного ПРИ (инденторов-эллипсоидов) и сравнительный анализ напряженного состояния одиночных твердосплавных

вставок различных форм (сферической, баллистической, тороидальной, клиновой). В работе И.А. Жукова [11] приведена зависимость «сила–внедрение» для буровых коронок с числом инденторов 1–4, дается оценка влияния количества инденторов на объем разрушенной породы, рекомендованы рациональные схемы размещения инденторов.

Вычислительные эксперименты на основе метода конечных элементов позволили проводить расчеты на новом уровне: определять и оценивать напряженно-деформированное состояние бойков ударных механизмов [48], инденторов, а также горных пород [37, 40].

Определение энергетических параметров буровых агрегатов

Вопросам разработки методов определения энергии волн деформаций, направленных на разрушение горных пород, посвящена работа В.П. Рындина [14]. Автор приводит классификацию и анализ всех доступных в настоящее время методов измерения энергии удара буровых агрегатов. Частота и энергия удара – одни из основных параметров, которые определяют производительность буровой машины. Методы и технические средства для измерения энергии и частоты ударов постоянно совершенствуются. Особенно острым стал этот вопрос при создании мощных буровых машин (с энергией удара 300 Дж и выше). Разработанный автором новый метод определения энергетических параметров буровых агрегатов и экспериментальная аппаратура для его реализации основаны на интегральных характеристиках импульсов и позволяют определять энергию волны деформации, распространяющейся к буровой коронке, независимо от типа генератора этих импульсов, с приемлемой для практики точностью и надежностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Йонссон Я. Найти оптимальный баланс: керн или шлам // Горное дело и строительство. Механизированная разработка пород с Atlas Сорсоу – 2005. – № 3. – С. 18–20.
2. Нейштетер И.А. Исследование энергоёмкости разрушения горных пород при вращательном и ударно-вращательном способах бурения алмазными коронками с целью прогнозирования механической скорости бурения: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1983. – 221 с.
3. Исследование процесса разрушения горных пород и производительности ударно-вращательного бурения при наложении высокочастотных ударов (с целью разработки рекомендаций по конструктивным и эксплуатационным параметрам высокочастотных гидроударных машин: Отчет о НИР: Тема 2–37/74 / руководители С.С. Сулакшин, В.П. Рожков. – Томск: ТПИ, 1976. – 99 с.
4. Терминологический словарь по бурению скважин / под ред. С.И. Голикова, А.Г. Калинина. – М.: Геоинформмарк, 2005. – 272 с.
5. Твердосплавный породоразрушающий инструмент для бурения скважин // ОАО «Туйское научно-исследовательское геологическое предприятие». URL: <http://tulnigp.ru/tverdospplavu-porodorazrushayuschi> (дата обращения: 27.04.2015).
6. Милютин А.Г., Калинин И.С., Карпиков А.П. Методика и техника разведки месторождений полезных ископаемых. – М.: Высшая школа, 2010. – 526 с.

Выводы

- 1) Представленное научное обобщение позволяет предложить новые технические решения, направленные на разработку ресурсосберегающей технологии и техники бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок, что имеет важное значение для эксплуатационной разведки полезных ископаемых при подземной разработке рудных месторождений.
- 2) В вопросах совершенствования технологий и техники бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок, реализующих энергию удара, одним из принципиальных факторов может быть унификация условий проведения экспериментов. В частности, необходимо использовать бурильную колонну, которой пробурено заданное количество метров скважин, чтобы были проработаны в производственных условиях стыки бурильных труб, через которые распространяются волны деформаций от ударного механизма к породоразрушающему инструменту.
- 3) Дополнительной возможностью повышения производительности буровых агрегатов ударно-вращательного действия с различными типами приводов (пневматический, гидравлический, электропневматический, пневмогидравлический) может быть сокращение времени на вспомогательные операции. Решение такой задачи требует разработки методики расчета и обоснования параметров буровых агрегатов, которая на этапе проектирования позволяет оценить их ресурсоэффективность на основе некоторых критериев (например, приведенных затрат, себестоимости метра пробуренной скважины, материалоёмкости агрегата и бурового инструмента).
7. Важнейшие результаты исследований ИГД СО РАН в 2005 г. // Институт горного дела СО РАН. URL: <http://www.misd.nsc.ru/about/results/> (дата обращения: 13.05.2005).
8. Матвеева Л.И. Выбор и обоснование конструктивных параметров малогабаритных погружных пневмоударников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владикавказ, 2004. – 20 с.
9. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М.: Наука, 1985. – 357 с.
10. Влияние формы ударника на импульсы напряжений и эффективность разрушения горной породы / Л.И. Барон, Ю.Г. Коняшин, А.В. Кузнецов, В.М. Курбатов // Шахтное строительство. – 1969. – № 8. – С. 8–10.
11. Жуков И.А. Формирование упругих волн в волноводах при ударе по ним полукатеноидальными бойками: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2005. – 132 с.
12. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
13. Мясников А.А. Обоснование рациональной конструкции механического генератора волн продольных колебаний машин ударного действия для разрушения горных пород: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1983. – 19 с.

14. Рындин В.П. Определение энергетических параметров и совершенствование динамики ударных систем бурильных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2005. – 330 с.
15. Дворников Л.Т. Исследование режимов бурения шпуров в горных породах машинами вращательного и вращательно-ударного действия: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 1974. – 61 с.
16. Губанов Е.Ф. Ударное разрушение хрупких сред при использовании в них отверстий без поворота инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2003. – 22 с.
17. Дерюшева В.Н. Модели пневмогидравлического ударного узла с учетом свойств формователя импульса и нагрузки: автореф. канд. ... техн. наук. – Томск, 2009. – 19 с.
18. Астафьев В.Д. О теоретическом определении продолжительности соударения элементов ударных механизмов. – М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1956. – 19 с.
19. Топоров Г.В., Левандовский М.Я. Оптимальная форма поверхностей контакта деталей машин ударного действия // Известия вузов. Горный журнал. – 1969. – № 11. – С. 83–85.
20. Городилов Л.В. Разработка основ теории гидроударных систем объемного типа для исполнительных органов горных и строительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 39 с.
21. Сердечный А.С. Управление амплитудой и длительностью ударного импульса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1997. – 31 с.
22. Саруев Л.А., Шадрина А.В., Саруев А.Л. Разработка методики расчета максимальных напряжений в элементах резьбовых соединений труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2010. – Вып. 12. – С. 11–15.
23. Александров Е.В., Флавицкий Ю.Ф., Хомяков К.С. Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих стержней произвольной геометрической формы. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1965. – 40 с.
24. Beccu R., Lundberg B. Transmission and dissipation of stress wave energy under a percussive drill rod joint // International Journal of Impact Engineering. – 1987. – V. 6. – № 3. – P. 157–173.
25. Hustrulid W., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of percussive drilling of rock // International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1972. – V. 9. – № 3. – P. 417–418.
26. Алимов О.Д. О механизме разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении бурильными молотками // Известия Томского политехнического университета. – 1954. – Т. 75. – С. 351–371.
27. Беляев Ю.В. Об оценке степени использования энергии удара в ударных машинах // Сборник трудов Всесоюзного НИИ строительного дорожного машиностроения. – М.: Машгиз, 1955. – № 10. – С. 35–49.
28. Кучеров П.С. К вопросу об исследовании пневматических отбойных молотков // Уголь. – 1933. – № 93. – С. 62–73.
29. Мостков В.М. Основы теории пневматического бурения. – М.: Углетехиздат, 1952. – 140 с.
30. Цуканов А.Г. О потерях энергии удара в удлиненных штангах // Известия вузов. Горный журнал. – 1965. – № 10. – С. 92–95.
31. Отчет лаборатории удара и вибрации ИГД им. А.А. Скочинского по теме № 58, этап 4 «Рекомендации по проектированию соединений буровых штанг». – М., 1966. – 62 с.
32. Алабужев П.М., Стихановский Б.Н., Шпигельбурд И.Я. Введение в теорию удара. – Новосибирск: НЭТИ, 1970. – 158 с.
33. Жлобинский Б.А. Динамическое разрушение горных пород при вдавливаниях. – М.: Недра, 1970. – 152 с.
34. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 367 с.
35. Нескоромных В.В., Храменков В.Г. Оптимизация в геологоразведочном бурении. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 256 с.
36. Павлова Н.Н., Шрейнер Л.А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. – М.: Недра, 1964. – 159 с.
37. Куклин С.А. Исследование особенностей воздействия на горную породу инденторов-эллипсоидов // Проблемы машиностроения и горных машин: матер. XV науч.-практ. конф. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2005. – С. 35–42.
38. Емшанов А.А. Alpha 330 – новый буровой горный инструмент компании SANDVIK // Горная промышленность. – 2006. – № 1. – С. 32–34.
39. Зайцев В.И. Научно-методические основы создания и эксплуатации твердосплавного инструмента для бурения шпуров ударными способами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1989. – 37 с.
40. Куклин С.А. Обоснование рациональных форм твердосплавных вставок (инденторов) для бурения шпуров машинами ударного действия: дис. ... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 1998. – 120 с.
41. Медовый Ю.А. Обоснование, исследование и серийное освоение буровых коронок типа КТШ: дис. ... канд. техн. наук (в форме научного доклада). – Кемерово, 1991. – 26 с.
42. Хесин Г.Л., Бабенков И.С., Иванов К.И. Распределение напряжений в буровом инструменте и породе. Статические и динамические исследования методом фотоупругости. – М.: Центральный научно-исследовательский институт экономики и научно-технической информации угольной промышленности, 1963. – 90 с.
43. Куликов И.В., Воронов В.Н., Николаев И.И. Пневмоударное бурение разведочных скважин. – М.: Недра, 1989. – 239 с.
44. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения. – М.: Недра, 1975. – 303 с.
45. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. – М.: Недра, 1975. – 224 с.
46. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 199 с.
47. Андреев В.Д. Исследование и расчет динамических нагрузок и механических параметров ударных систем буровых машин: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 1972. – 33 с.
48. Дружинин М.М. Реализация численного моделирования напряженно-деформированного состояния бойка погружного пневмоударника // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2009. – № 9. URL: http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Drujinin_9_2009.pdf (дата обращения: 15.12.2013).
49. Пучинян Г.С. Исследование и создание методики расчета сложнонагруженных резьбовых соединений: дис. ... канд. техн. наук. – Фрунзе, 1989. – 162 с.
50. Слепухин В.В. Моделирование волновых процессов при продольном ударе в стержневых системах неоднородной структуры: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Ульяновск, 2010. – 19 с.
51. Слестин А.П., Саруев Л.А. Моделирование процесса соударения бойка с хвостовиком ударного инструмента // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 116–119.
52. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – М.: Недра, 1977. – 160 с.
53. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
54. Малков О.Б. Динамика стержневых систем с внутренними граничными поверхностями: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. – Омск, 2000. – 23 с.
55. Манжосов В.К., Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
56. Авдеева А.И., Шадрина А.В., Саруев Л.А. Разработка методики расчета распространения продольных волн деформаций по буровому инструменту // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – С. 328–333.

Поступила 14.05.2015 г.

UDC 622.24.053:531.5

ANALYSIS AND SCIENCE-BASED COMPILATION OF THE RESULTS OF STUDYING PERCUSSION-ROTARY UNDERGROUND SLIMHOLE DIGGING

Anastasiya V. Shadrina,

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

Lev A. Saruev,

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

The relevance of the research is caused by the necessity of improving the engineering and technology of geological explorations and the energy and resource efficiency of drilling.

The main aim of the research is to analyse and generalize research results obtained for the possible development and application of the resource-efficient drilling technology using the strain wave generator. The literature review of theoretical and experimental research was carried out in percussion drilling of small holes in medium-hard and harder rocks. To increase the penetration rate, the percussive mechanisms were designed. However, the increase of strain wave energy is reduced by the strength of the drilling tool. At constant hole diameter, the increased impact load should be transmitted over the drill string and their connections having the original size. These very elements of a drill string are the deterrents to implement a new technology.

Methodology: theoretical analysis; a vast review of scientific literature on all problems of power pulse formation, strain wave transmission over the drill string, rock failure, appropriate modes of operation of percussion drilling, drilling optimization prior the engineering process, design techniques chosen for percussion drilling systems, work process modeling, energy parameter determination for drilling units, comparison of independent research results

Findings. The paper introduces the modern ideas and achievements in the field of small hole percussion drilling. The authors have identified the causes of research results divergence. The expediency of carrying out the research to improve technological and engineering processes and drilling techniques was shown. The authors determined the main trends in researching drilling technology and engineering process and stated the recommendations for improving drilling effectiveness due to intensification of rock failure at well boring.

Key words:

Exploratory drilling, drilling technique, underground digging, drill string, impact pulses generation, strain waves transfer along the drill string, rock failure, drilling optimization, work process simulation, drill rig energy parameters.

REFERENCES

- Jönsson J. In search of the right balance. *Mining & Construction. Mechanized rock excavation with Atlas Copco*, 2005, no. 3, pp. 18–20.
- Neyshteter I.A. *Issledovanie energoemkosti razrusheniya gornyykh porod pri vrashchatelnom i udarno-vrashchatelnom sposobakh bureniya almaznymi koronkami s tselyu prognozirovaniya mekhanicheskoy skorosti bureniya*. Dis. Kand. nauk [A study of specific fracture energy at percussion-rotary drilling for drilling speed prognosis purposes. Cand. Diss.]. Tomsk, 1983. 221 p.
- Sulakshin S.S., Rozhkov V.P. *Issledovanie protsessa razrusheniya gornyykh porod i proizvoditelnosti udarno-vrashchatelnogo bureniya pri nalozhenii vysokochastotnykh udarov (s tselyu razrabotki rekomendatsiy po konstruktivnym i ekspluatatsionnym parametram vysokochastotnykh gidroudarnyykh mashin: otchet o NIR: Tema 2–37/74* [A study of rock failure and rotary-percussive drilling productivity at high-frequency impacts (for drafting of guidelines for hydraulic hammer design and operating parameters): Research report: 2–37/74]. Tomsk, TPI Publ. house, 1976. 99 p.
- Terminologicheskoy slovar po bureniyu skvazhin* [Terminological dictionary for drilling wells]. Eds. S.I. Golikova, A.G. Kalinina. Moscow, Geoinformmark Publ., 2005. 272 p.
- Tverdospilnyy porodorazrushayushchy instrument dlya bureniya skvazhin* [The carbide rock destruction tools for drilling wells]. Available at: <http://tulanigp.ru/tverdospilnyy-porodorazrushayuschi> (accessed 27 April 2015).
- Milyutin A.G. *Metodika i tekhnika razvedki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Methodology and technics for mineral exploration]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 526 p.
- Vazhneyshie rezultaty issledovaniy IGD SO RAN v 2005 g.* [The most important research results of Institute of Mining Affairs SB RAS]. Available at: <http://www.misd.nsc.ru/about/results/> (accessed 13 May 2015).
- Matveeva L.I. *Vybor i obosnovanie konstruktivnykh parametrov malogabaritnykh pogruzhnykh pnevmoudarnikov*. Dis. Kand. nauk [Choice and validation of small-size downhole hammers design value. Cand. Diss.]. Vladikavkaz, 2004. 20 p.
- Alimov O., Manzhosov V., Eremyants V. *Udar. Rasprostraneniye voln deformatsiy v udarnyykh sistemakh* [Impulse. The propagation of strain waves in percussion system]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 357 p.
- Baron L.I. *Vliyaniye formy udarnika na impulsy napryazheniy i effektivnost razrusheniya gornoy porody* [The influence of hammer form on tension impulses and rock failure efficiency]. *Shahtnoe stroitelstvo*, 1969, no. 8, pp. 8–10.
- Zhukov I.A. *Formirovaniye uprugikh voln v volnovodakh pri udare po nim polukatenoidalnymi boykami*. Dis. Kand. nauk [The generation of elastic waves in waveguides using semicatenoidal hammers. Cand. Diss.]. Tomsk, 2005. 132 p.
- Ivanov K.I. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Drilling technique for exploitation of mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
- Myasnikov A.A. *Obosnovaniye ratsionalnoy konstruksii mekhanicheskogo generatora voln prodolnykh kolebaniy mashin udarnogo deystviya dlya razrusheniya gornyykh porod*. Dis. Cand. nauk [Validation of rational construction of longitudinal oscillation mechanical generator of impact drilling machine for rock failure. Cand. Diss.]. Alma-Ata, 1983. 19 p.
- Ryndin V.P. *Opredeleniye energeticheskikh parametrov i sovershenstvovaniye dinamiki udarnyykh sistem burilnykh mashin*.

- Doct. Dis. [Determination of energy parameters and retrofit of dynamics of drilling machine impact. Dr. Diss.]. Kemerovo, 2005. 330 p.
15. Dvornikov L.T. *Issledovanie rezhimov bureniya shpurov v gornykh porodakh mashinami vrashhatelnogo i vrashhatelno-udarnogo deystviya*. Doct. Dis. [The investigation of shot hole drilling practices by rotative and rotary-percussive action drillrigs. Dr. Diss.]. Tomsk, 1974. 61 p.
 16. Gubanov E.F. *Udarное razrushenie khrupkikh sred pri ispolzovanii v nikh otverstiy bez povorota instrumenta*. Dis. Kand. nauk [The impact failure of brittle rocks using percussion drilling tool without angular rotation. Cand. Diss.]. Tomsk, 2003. 22 p.
 17. Deryusheva V.N. *Modeli pnevmogidravlicheskogo udarnogo uzla s uchetom svoystv formirovatel'ya impulsa i nagruzki*. Dis. Kand. nauk [The airdraulic percussive mechanism models that takes into account the impulse generator and loading characteristics. Cand. Diss.]. Tomsk, 2009. 19 p.
 18. Astafev V.D. *O teoreticheskom opredelenii prodolzhitel'nosti soudareniya elementov udarnykh mekhanizmov* [On theoretic definition of the impact time of percussive mechanism elements]. Moscow, Institute of Mining Affairs Publ., 1956. 19 p.
 19. Toporov G.V., Levandovskiy M.Ya. *Optimal'naya forma poverkhnostey kontakta detaley mashin udarnogo deystviya* [The optimum shape of contact surfaces of impacting machines elements]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1969, no. 11, pp. 83–85.
 20. Gorodilov L.V. *Razrabotka osnov teorii gidroudarnykh sistem obemnogo tipa dlya ispolnitel'nykh organov gornykh i stroitel'nykh mashin*. Dis. Doct. nauk [Development of the theory of hydropercussion systems for operating members of mining and construction machines. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2010. 39 p.
 21. Serdechny A.S. *Upravlenie amplitudoy i dlitel'nostyu udarnogo impulsa*. Dis. Doct. nauk [The control of pulse height and duration. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1997. 31 p.
 22. Saruev L.A., Shadrina A.V., Saruev A.L. *Razrabotka metodiki rascheta maksimalnykh napryazheniy v elementakh rezbovykh soedineniy trub pri vrashhatelno-udarnom burenii skvazhin malogo diametra* [The development of maximum strain calculation methodology in thread connection elements of drill string under rotary-percussion underground slimhole drilling]. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*, 2010. no. 12, pp. 11–15.
 23. Aleksandrov E.V., Flavitskiy Yu.F., Homyakov K.S. *Opredelenie impulsov napryazheniya pri prodolnom soudarenii uprugikh sterzhney proizvol'noy geometricheskoy formy* [Definition of tension impulses under longitudinal impact of arbitrary shape rods]. Moscow, IGD im. A.A. Skochinskogo Publ., 1965. 40 p.
 24. Beccu R., Lundberg B. *Transmission and dissipation of stress wave energy under a percussive drill rod joint*. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, vol. 6, no. 3, pp. 157–173.
 25. Hustrulid W., Fairhurst C. *A theoretical and experimental study of percussive drilling of rock*. *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1972, vol. 9, no. 3, pp. 417–418.
 26. Alimov O.D. *O mekhanizme razrusheniya gornykh porod pri udarno-vrashchatel'nom burenii buril'nymi molotkami* [The rock failure mechanism under percussion-rotary drilling by blast-hole drills]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta*, 1954, vol. 75, pp. 351–371.
 27. Belyaev Yu.V. *Ob otsenke stepeni ispolzovaniya energii udara v udarnykh mashinakh* [The impact energy application efficiency in the impactors]. *Sbornik trudov Vsesoyuznogo NII stroitel'no-dorozhnogo mashinostroeniya* [Collected papers of All-Union Research Institute of constructive-road machine engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, no. 10, pp. 35–49.
 28. Kucherov P.S. *K voprosu ob issledovanii pnevmaticheskikh otboynykh molotkov* [Investigation of pneumatic picks]. *Ugol*, 1933, no. 93, pp. 62–73.
 29. Mostkov V.M. *Osnovy teorii pnevmaticheskogo bureniya* [Foundations of air-drilling theory]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1952. 140 p.
 30. Tsukanov A.G. *O poteryakh energii udara v udlinennykh shtangakh* [Lost of impact energy in long rods]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1965, no. 10, pp. 92–95.
 31. *Otchet laboratorii udara i vibratsii IGD im. A.A. Skochinskogo po teme № 58, etap 4 «Rekomendatsii po proektirovaniyu soedineniy burovyykh shtang»* [The report of impact and vibration laboratory named after A.A. Skochinskii, topic no. 58, step 4, «The guidelines for drill-rods joints design»]. Moscow, 1966. 62 p.
 32. Alabuzhev P.M., Stikhanovskiy B.N., Shpigelburd I.Ya. *Vvedenie v teoriyu udara* [The introduction into impact theory]. Novosibirsk, NJeTI Publ., 1970. 158 p.
 33. Zhlobinskiy B.A. *Dinamicheskoe razrushenie gornykh porod pri vдавливании* [Dynamic rock disintegration during denting]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 152 p.
 34. Sulakshin S.S., Chubik P.S. *Razrushenie gornykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Rock failure under geological exploration works]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 367 p.
 35. Neskorumnykh V.V., Khramenkov V.G. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom burenii* [Exploratory drilling optimization]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 256 p.
 36. Pavlova N.N., Shreyner L.A. *Razrushenie gornykh porod pri dinamicheskom nagruzenii* [Rock failure under dynamic loading]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 159 p.
 37. Kuklin S.A. *Issledovanie osobennostey vozdeystviya na gornuyu porodu indentorov-ellipsoyidov* [The research of influence of ellipsoid indentors on rock]. *Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy mashinostroeniya i gornykh mashin»* [Proc. 15th Research and Application Conference. Problems of machine construction and mining machines]. Novokuznetsk, 2005. pp. 35–42.
 38. Emshanov A.A. *Alpha 330 – novyy burovo gornyy instrument kompanii SANDVIK* [Alpha 330 is the new SANDVIK drilling tool]. *Gornaya promyshlennost*, 2006, no. 1, pp. 32–34.
 39. Zaytsev V.I. *Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i ekspluatatsii tverdosplavnogo instrumenta dlya bureniya shpurov udarnymi sposobami*. Dis. Doct. nauk [The hard-carbide tools development and operation methodology for percussion blasthole drilling. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1989. 37 p.
 40. Kuklin S.A. *Obosnovanie ratsionalnykh form tverdosplavnykh vstavok (indentorov) dlya bureniya shpurov mashinami udarnogo deystviya*. Dis. Kand. nauk [The definition of indenters rational forms for percussion blasthole drilling. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 1998. 120 p.
 41. Medovy Yu.A. *Obosnovanie, issledovanie i seriynee osvoenie burovyykh koronok tipa KTSh*. Dis. Kand. nauk [The research, evaluation and full-scale production of KTSh insert bits. Cand. Diss.]. Kemerovo, 1991. 26 p.
 42. Khesin G.L., Babenkov I.S., Ivanov K.I. *Raspredelenie napryazheniy v burovom instrumente i porode. Sticheskie i dinamicheskie issledovaniya metodom fotouprugosti* [Stress distribution in drilling tools and rock. Photoelastic method investigations under static and dynamic conditions]. Moscow, 1963. 90 p.
 43. Kulikov I.V., Voronov V.N., Nikolaev I.I. *Pnevmodarnoe burenie razvedochnykh skvazhin* [The exploratory wells air percussion drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 239 p.
 44. Kozlovskiy E.A. *Optimizatsiya protsessa razvedochnogo bureniya* [The exploratory drilling optimization]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 303 p.
 45. Medvedev I.F. *Rezhimy bureniya i vybor burovyykh mashin* [The drilling practices and drilling machines selection]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 224 p.
 46. Aleksandrov E.V., Sokolinskiy V.B. *Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem* [The percussion systems applicable theory and calculations]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 199 p.

47. Andreev V.D. *Issledovanie i raschet dinamicheskikh nagruzok i mekhanicheskikh parametrov udarnykh sistem burovyykh mashin*. Dis. Dokt. nauk [The dynamic forces and mechanical parameters in percussion mechanisms of drilling machines. Dr. Diss.]. Dnepropetrovsk, 1972. 33 p.
48. Druzhinin M.M. Realizatsiya chislennogo modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boyka pogrurnogo pnevmoudarnika [The numerical simulation of strain-stress state downhole hammer]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2009, no. 9. Available at: http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Druzhinin_9_2009.pdf (accessed 15 December 2013).
49. Puchinyan G.S. *Issledovanie i sozdanie metodiki rascheta slozhnonagruzhenykh rezbovykh soedineniy*. Dis. Kand. nauk [Research and calculation method development of thread connections under complex loading. Cand. Diss.]. Frunze, 1989. 162 p.
50. Slepukhin V.V. *Modelirovanie volnovykh protsessov pri prodolnom udare v sterzhnevyykh sistemakh neodnorodnoy struktury*. Dis. Kand. nauk [Wave process simulation in waveguides with heterogeneous structure under longitudinal impact. Cand. Diss.]. Ulyanovsk, 2010. 19 p.
51. Slistin A.P., Saruev L.A. Modelirovanie protsessa soudareniya boyka s khvostovikom udarnogo instrumenta [Simulation of impact between anvil block and shank]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 2, pp. 116–119.
52. Shelkovnikov I.G. *Ispolzovanie energii udara v protsessakh bureniya* [Application of impact energy in drilling process]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 160 p.
53. Eygeles R.M., Strekalova R.V. *Raschet i optimizatsiya protsessov bureniya skvazhin* [Well drilling calculation and optimization]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 200 p.
54. Malkov O.B. *Dinamika sterzhnevyykh sistem s vnutrennimi granichnymi poverkhnostyami*. Dis. Dokt. nauk [The dynamics of wave guides with boundary surfaces. Dr. Diss.]. Omsk, 2000. 23 p.
55. Manzhosov V.K., Slepukhin V.V. *Modelirovanie prodolnogo udara v sterzhnevyykh sistemakh neodnorodnoy struktury* [Longitudinal impact simulation in wave guides with heterogeneous structure]. Ulyanovsk, 2011. 208 p.
56. Avdeeva A.I., Shadrina A.V., Saruev L.A. Razrabotka metodiki rascheta rasprostraneniya prodolnykh voln deformatsiy po burovomu instrumentu [The development of calculation methods of dilatational strain waves propagating throughout the drilling tool]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. pp. 328–333.

Received: 14 May 2015.

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати *xx.xx.2015*. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,05. Уч.-изд. л. 14,51.
Заказ *xxx-15*. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru