

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



ISSN 1684-8519

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 326, № 4, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционная коллегия

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

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия ТПУ»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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

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



ISSN 1684-8519

BULLETIN

OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY

Volume 326, № 4, 2015

TPU  PUBLISHING
Tomsk

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2015

AIMS AND SCOPES

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

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

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

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

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

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

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

The Bulletin of the Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Особенности обработки и интерпретации магниторазведочных и литохимических данных при поисках месторождений нефти и газа в условиях сибирской платформы (на примере Имбинской газоносной площади)** 6
Соболев И.С., Бредихин Н.П., Меркулов В.П., Орехов А.Н.
- Геолого-геохимическая модель бетюгенского золото-сурьмяного рудного поля (Республика Саха (Якутия))** 19
Гаврилов Р.Ю., Ворошилов В.Г., Сенкевич В.С., Тямисов Н.Э., Широков В.В.
- Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных породах** 30
Нескоромных В.В., Петенёв П.Г., Неверов А.Л., Пушмин П.С., Романов Г.Р.
- Природные особенности строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» на участке Чайандинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск** 41
Строкова Л.А., Ермолаева А.В.
- Статистический анализ качества трудноизвлекаемых нефтей** 56
Ященко И.Г., Полищук Ю.М.
- Оценка нефтегазоносности доюрских резервуаров Усть-Тымской мегавпадины (с использованием данных геотермии и бурения)** 67
Лобова Г.А., Пракойо Ф.С., Ахметов Е.М., Исаева О.С.
- Пространственная структура наземного растительного покрова и типа верхнего слоя торфа северо-восточных отрогов большого Васюганского болота по дистанционным и наземным данным** 81
Алексеева М.Н., Преис Ю.И., Дюкарев Е.А.
- Гидродесульфирование дибензотиофена в присутствии массивных сульфидных катализаторов. Механизм реакций** 91
Акимов А.С., Морозов М.А., Федущак Т.А., Уймин М.А., Петренко Т.В., Восмериков А.В., Журавков С.П., Щеголева Н.Н.
- Концептуальные подходы и методология обращения с облученным перспективным ядерным топливом** 99
Беденко С.В., Кнышев В.В., Яковлев М.В., Плевака М.Н.
- Исследование энергосберегающего воздухораспределительного устройства перфоратора** 108
Глазов А.Н.
- Построение туннельных осесимметричных сверхзвуковых воздухозаборников** 117
Галкин В.М., Звегинцев В.И.
- Моделирование электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети** 125
Никонец Л.А., Никонец А.Л., Венгер В.П.
- Обеспечение благоприятного переключения транзисторов инвертора тока в преобразователях со звеном повышенной частоты** 138
Осипов А.В., Шиняков Ю.А., Отто А.И., Черная М.М., Ткаченко А.А.
- Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме** 146
Зюзов А.М., Метельков В.П.
- Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций** 154
Нейман Л.А., Нейман В.Ю.
- Features of processing and interpretation of magnetic and lithochemical data while exploring oil and gas fields in Siberian platform conditions (by the example of Imbinskaya gas-bearing area)** 6
Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Merkulov V.P., Orekhov A.N.
- Geology-geochemistry model of Betyugensk gold-antimony ore field (Republic of Sakha (Yakutia))** 19
Gavrilov R.Yu., Voroshilov V.G., Senkevich V.S., Tyamissof N.E., Vasily S.V.
- Development and pilot studies of the features of a diamond drill crown operation when drilling in solid anisotropic rocks** 30
Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Neverov A.L., Pushmin P.S., Romanov G.R.
- Natural features of constructing the main gas pipeline «The power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field – Lensk** 41
Strokova L.A., Ermolaeva A.V.
- Statistical analysis of quality of hard-to-recover oils** 56
Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M.
- Assessment of petroleum potential of the pre-Jurassic reservoirs of Ust-Tym megadepression (using the data of geothermics and drilling)** 67
Lobova G.A., Prakoyo F.S., Akhmetov E.M., Isaeva O.S.
- Spatial structure of vegetation cover and top layer of peat of northeastern spurs of the great Vasyugan mire by remote and ground data** 81
Alekseeva M.N., Preis Yu.I., Dyukarev E.A.
- Hydrodesulfurization of dbt with bulk sulphide catalysts. Reaction mechanism** 91
Akimov A.S., Morozov M.A., Fedushchak T.A., Uymin M.A., Petrenko T.V., Vosmerikov A.V., Zhuravkov S.P., Shchegoleva N.N.
- Conceptual approaches and methods of treating the irradiated potential nuclear fuel** 99
Bedenko S.V., Knyshev V.V., Yakovlev M.V., Plevaka M.N.
- Research of energy-saving air distribution unit of a perforator** 108
Glazov A.N.
- Forming of ducted axisymmetric supersonic air inlets** 117
Galkin V.M., Zvegintsev V. I.
- Modeling of electromagnetic processes in transformer windings under the influence of network overvoltage** 125
Nykonets L.A., Nykonets A.L., Venger V.P.
- Favorable switching of transistors of the current inverter in converters with high-frequency link** 138
Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M., Tkachenko A.A.
- Accounting temperature fluctuations in stator winding of induction motor when checking for heating in intermittent mode** 146
Zyuzev A.M., Metelkov V.P.
- Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems** 154
Neyman L.A., Neyman V.Yu.

УДК 550.8.053: 550.84.094.2

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОРАЗВЕДОЧНЫХ И ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА В УСЛОВИЯХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (НА ПРИМЕРЕ ИМБИНСКОЙ ГАЗОНОСНОЙ ПЛОЩАДИ)

Соболев Игорь Станиславович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E mail: geolsob@yandex.ru

Бредихин Николай Петрович,

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E mail: bnp1991@mail.ru

Меркулов Виталий Павлович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры проектирования объектов нефтегазового комплекса Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E mail: merkulovvp@hw.tpu.ru

Орехов Александр Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: orekhovan@mail.tomsknet.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных способов обработки и подходов к интерпретации магнитометрических и литохимических данных при поисках залежей углеводородов в геологических условиях Сибирской платформы. Одной из особенностей геологического разреза Сибирской платформы является широкое развитие продуктов позднепермско-триасового базальтового магматизма. На фоне осадочных образований эффузивные покровы и интрузивные тела основного состава выделяются резкими отличиями магнитных свойств и уровней накопления ряда химических элементов. В целом для областей эпигенетического влияния углеводородных залежей характерна невысокая контрастность изменений содержания химических элементов и магнитных характеристик осадочной толщи. Породы трапповой формации вносят существенный вклад в флуктуацию магнитного и геохимического поля и формируют собственные аномалии, мешающие выделению и идентификации магнитных и литохимических неоднородностей, связанных со скоплениями нефти и газа. Поэтому применение выработанных на нефтегазоносных территориях с сугубо терригенным чехлом процедур обработки магнитных и литохимических данных требует внесения изменений, направленных на разделение аномалий эпигенетического и магматического генезиса.

Цель работы: создание алгоритма обработки магнитометрических и литохимических данных для выделения областей эпигенетического влияния углеводородных скоплений в условиях широкого развития продуктов триасового магматизма Сибирской платформы.

Методы исследования. Использовались результаты высокоточной магнитной съемки и литохимического опробования приповерхностных отложений на Имбинской газоносной площади Ангарской зоны складок.

Результаты. Разработаны специальные процедуры при применении полосовой фильтрации магнитометрических данных по методу Саксова–Нигарда и дифференциации литохимического поля с помощью показателей дисперсии и вариации геохимического спектра, направленные на идентификацию аномальных отклонений, обусловленных влиянием тел долеритов.

Ключевые слова:

Магнитная съемка, литохимические пробы, трапповый магматизм, углеводородные залежи, полосовая фильтрация, геохимический спектр.

Введение

Процессы вторичных минералого-геохимических изменений экзогенных пород, происходящих в результате воздействия углеводородных компонентов, продуктов их окисления и бактериального разложения, давно вызывают практический интерес в качестве косвенных поисковых признаков скоплений нефти и газа [1–3]. Эпигенетическое изменение физико-химических параметров среды, а также связанные с ним диагенетическое минералообразование и перераспределение химических элементов являются объектами изучения при реализации группы так называемых «полупрямых»

геохимических и геофизических методов поисков углеводородных месторождений [4–7].

Обсуждаемые в статье магнитометрические и литохимические исследования при поисках нефти и газа ориентированы на обнаружение в верхней части разреза аномалий, связанных с эпигенетическими процессами формирования железистых, титанистых, хлоридных, гипсовых, глинистых, карбонатных, силикатных, сульфидных новообразований, миграции и осаднении химических элементов и их соединений.

Аномальные отклонения в содержании химических элементов и развитие вторичной минера-

лизации объясняются специфическими физико-химическими параметрами среды в границах столба измененных пород над скоплениями углеводородов [5, 6, 8–10]. Высокие флюидоупорные свойства покрышек нефтегазовых ловушек и наличие субвертикальных зон повышенной проницаемости, связанных с процессами пластической деформации на крыльях антиклинальных складок и других структурных осложнений, обуславливает преобладание диффузионного или инфильтрационного механизмов массопереноса вещества. В контуре нефтегазоносности, где доминируют процессы диффузии, в приповерхностных горизонтах окислению подвергается в основном достигающий их метан и его газообразные гомологи. Главными продуктами реакции окисления являются CO_2 и H_2O . В области водоуглеводородного контакта, по сопряженным с ним зонам повышенной проницаемости, активны фильтрационные процессы миграции углеводородных и других соединений. В этих условиях дневной поверхности достигают более сложные углеводородные компоненты, усиливающие восстановительную обстановку за счет высвобождения при их расщеплении радикала $(\text{OH})^-$ и образования H_2S в результате восстановления сульфатов десульфидирующими бактериями. Таким образом, в различных частях проекции залежей углеводородов в приповерхностных горизонтах происходит дифференциация геохимического поля по интенсивности миграционного потока и его составу. Как следствие, это отражается на кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных параметрах среды, которые во многом определяют особенности вторичного преобразования осадочных пород. Согласно опубликованным данным в приповерхностных условиях проекция контура нефтегазоносности происходит аномальное отклонение pH и Eh, но для разных объектов приводятся противоположные данные об увеличении кислотности или щелочности, росте или снижении значений окислительно-восстановительного потенциала [5, 6, 11–16]. Направление изменений кислотно-щелочного и окислительно-восстановительного показателя в значительной мере связано с активностью деятельности микроорганизмов, содержанием гумуса и литологических особенностей пород верхней части разреза [10, 11, 14, 15]. Однако, по всей видимости, для процессов эпигенетического минералообразования и перераспределения химических элементов в зонах влияния водоуглеводородных контактов в первую очередь важно наличие контрастного pH-Eh градиента [14].

Генезис магнитных аномалий в области внедрения миграционного потока из залежи углеводородов связывают с реакциями, протекающими при участии сероводорода и уголекислоты, в результате которых, в зависимости от их количества, за счет окислов и гидроокислов железа терригенных образований в приповерхностной зоне над залежами могут возникать железистые минералы со слабы-

ми (гематит, гетит, сидерит) и сильными (магнетит, пирротин, грейгит, маггемит) магнитными свойствами, а также немагнитный пирит [9, 17–20]. Существенную роль в формировании магнитных минералов играют поглощающие углеводороды бактерии [21, 22]. В результате происходит как относительное увеличение, так и уменьшение магнитной восприимчивости осадочных пород с возникновением повышенной неоднородности высокочастотной составляющей аномального магнитного поля (так называемые микромагнитные аномалии) [4, 16, 23–32]. Кроме того, как правило, наблюдается характерная волнообразная аномалия магнитного поля с относительным понижением над залежью на 10–15 нТл, обусловленная общим понижением магнитных свойств в надзалежном пространстве за счет восстановительной обстановки.

Кроме железистых минералов, в результате изменений физико-химических параметров среды и биохимической деятельности микроорганизмов над скоплениями нефти и газа происходит вторичная карбонатизация, окремнение, сульфидизация, глинизация [1, 5, 6, 14, 33–38]. Метасоматические изменения пород, в свою очередь, сопровождаются перераспределением макро- и микроэлементов. В литературе приводится информация о том, что над углеводородными скоплениями в приповерхностном горизонте в различных формах нахождения могут возникать аномалии Ca, Mg, Na, Al, Fe, Mn, Si [5, 6, 14, 36], V, Cr, Ni, Co, Zn, Cu, Mo, Pb, Ti [5, 6, 10, 38–47] Hg [41, 46, 48] Sr, Ba [42, 43, 49], Cl, Br, J [10, 11, 46, 50, 51], As, Cd, Se [46], Ba, Ce [6]. Обширные по фактическому и теоретическому материалу исследования касаются использования естественных радионуклидов как индикаторов нефтегазоносности, которые в данной статье не обсуждаются. Весьма широкий спектр химических элементов, образующих над скоплениями нефти и газа аномалии, по всей видимости, обусловлен их различной подвижностью, в том числе в зависимости от геологического строения территории, ее климатической принадлежности, ландшафтно-геохимических особенностей.

Во время проведения исследований Имбинская газоносная площадь представляла для авторов статьи особый интерес с точки зрения адаптации методики обработки и интерпретации магнитных и литохимических данных к условиям Сибирской платформы. В отличие от геологического разреза Западно-Сибирской плиты, дополнительным затрудняющим выделение эпигенетических аномалий фактором явились силлы долеритов, залегающие на различных стратиграфических уровнях, вплоть до выхода на дневную поверхность. Это потребовало применения специальных процедур обработки магнитного и геохимического полей с целью снижения влияния этих магнитовозмущающих и контрастно выделяющихся по содержанию ряда химических элементов магматических образований.

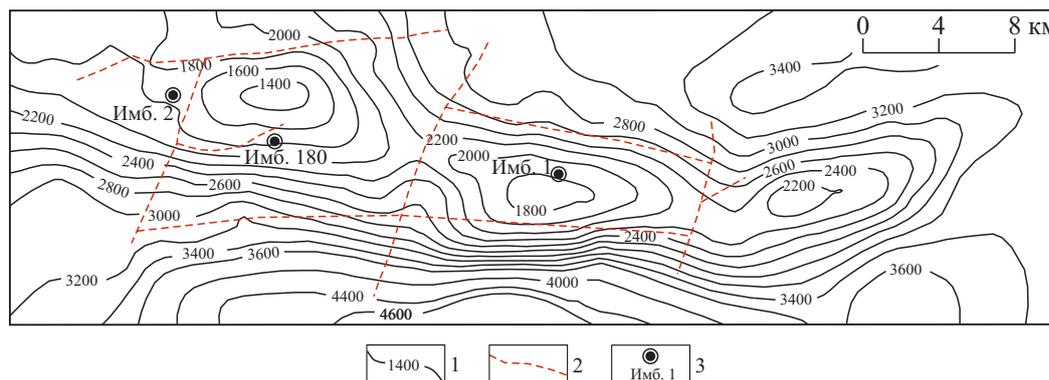


Рис. 1. Структурная карта по отражающему горизонту Б (по ООО «Богучанская геофизическая экспедиция», 2009): 1) изогипсы кровли тэтэрской свиты (ϵ, tt , м); 2) тектонические нарушения; 3) скважины

Fig. 1. Structural map of the reflecting horizon B (by the «Boguchanskaya geophysical expedition», 2009); 1) teterskaya strata top contour line (ϵ, tt , m); 2) tectonic disturbances; 3) wells

Краткое описание геологического строения Имбинской газоносной площади

Территориально Имбинская газоносная площадь расположена в бассейне нижнего течения р. Ангары, в 10 км северо-восточнее районного центра пос. Богучаны Красноярского края. В структурно-тектоническом отношении площадь исследований охватывает Имбинское поднятие, являющееся одной из локальных структур Ангарской зоны складок. По отражающему горизонту Б (кровля тэтэрской свиты) поднятие представляет собой вытянутую в широтном направлении антиклинальную складку размерами 52?7 км с амплитудой 1290 м и площадью 296 км² (рис. 1).

В строении геологического разреза, вскрытого тремя скважинами на максимальную глубину 3011 м, выделяют два структурных яруса, соответствующих формированию фундамента и осадочного чехла и разделенных существенным стратиграфическим несогласием. Нижний структурный ярус охватывает объем архей – протерозойских пород, входящих в состав фундамента, а верхний включает платформенные образования от рифея (верхний протерозой) до современных осадочных образований (табл. 1).

Серией поперечных разломов Имбинское поднятие разбито на четыре блока, ступеневато поднимающихся в северо-западном направлении. Неодинаковая амплитуда вертикальных тектонических движений различных сегментов отчетливо прослеживается в изменениях глубин границ свит по скважинам (табл. 1) и особенностями стратиграфии выходящих на дневную поверхность отложений (рис. 2).

Продукты триасового магматизма локализованы на двух уровнях. Первый связан с отложениями усольской свиты, второй охватывает верхнюю часть разреза. Фиксируется резкое увеличение мощности силлов с 74 м (крайняя восточная скв. Имб-1) до 153 м (центральная скв. Имб-180) и далее на запад до 332 м (скв. Имб-2) в сторону границы выклинивания. В этом же направлении установлен и подъем горизонтов вмещающих пород на

119 м в подтрапповой и на 394 м в надтрапповой толще. Более контрастный подъем надтрапповой толщи практически полностью обусловлен увеличением мощности интрузии [52]. Участки распространения тел долеритов в верхней части разреза контрастно выражены положительными формами рельефа местности и трассируются единичными скальными выходами.

В Ангарской зоне складок выделяется снизу вверх четыре нефтегазоносных комплекса (НГК) [53]:

- прогнозируемый рифейский;
- вендский с продуктивными горизонтами в аleshинской, чистяковской и мошаконской свитах (табл. 1);
- верхневендско–нижнекембрийский с газоносными пластами собинской свиты;
- кембрийский с потенциальной продуктивностью бельской и ангарской свит.

В скважинах Имбинской площади притоки газа получены из отложений чистяковской, редколесной, катангской и собинской свит.

Методика выполнения работ

Высокоточная магнитная съемка и литохимическое опробование проводилось по нерегулярной сети сейсморазведочных профилей и полевых дорог (рис. 3).

Магнитные измерения осуществлялись протонными магнитометрами МПП-203М шагом 25 м с одновременной регистрацией вариации магнитного поля.

Отбор литохимических проб проводился с помощью ручного бура с глубины 0,5–0,7 м. Шаг опробования составил 500–1000 м. Всего было отобрано 421 проба.

Литохимические пробы анализировались эмиссионным спектральным полуколичественным анализом (ЭСПА) с определением концентраций тридцати двух химических элементов.

Кроме того, на Имбинской площади выполнен комплекс наземных радиохимических исследований, главные результаты которых приведены в публикации [54].

Таблица 1. Генерализованная стратиграфическая колонка для Имбинской площади с разбивкой интервалов глубин залегания (м) стратиграфических подразделений по скважинам

Table 1. Generalized stratigraphic column for Imbinsk area with well depth interval partition (m) of stratigraphic units

| Система/System | Свита/Strata | Нефтегазоносный комплекс Oil-and-gas bearing complex | Скважины/Wells | | |
|---|--|--|----------------|-----------|-----------|
| | | | Имб-180 | Имб-1 | Имб-2 |
| Четвертичная Quaternary | – | – | – | 0–18 | – |
| Ордовикская Ordovician | Ийская (O _{1s})/Iiskaya | – | – | – | – |
| | Усть-кутская (O _{1uk})/Ust-kutskaya | | – | – | – |
| Кембрийская Cambrian | Эвенкийская (Є _{2-3ev})/Evenskiyskaya | Кембрийский Cambrian | 0–158 | 18–176 | 0–31 |
| | Литвинцевская (Є _{2lit})/Letvintsevskaya | | 158–252 | 176–281 | 31–62 |
| | Ангарская (Є _{1-2an})/Angarskaya | | 252–443 | 281–470 | 62–275 |
| | Булайская (Є _{1bul})/Bulayskaya | | 443–516 | 470–545 | 275–336 |
| | Бельская (Є _{1bls})/Belskaya | | 516–1006 | 545–1120 | 336–815 |
| | Усольская (Є _{1us})/Usolskaya | Верхневендско – нижнекембрийский Upper Vendian – Low Cambrian | 1006–1958 | 1120–1988 | 815–2005 |
| Тэтэрская (Є _{1tt})/Teterskaya | 1958–2032 | | 1988–2068 | 2005–2075 | |
| Вендская Vendian | Собинская (Vsb)/Sobinskaya | Вендский Vendian | 2032–2202 | 2068–2172 | 2075–2241 |
| | Катангская (Vktg)/Katangskaya | | 2202–2382 | – | 2241–2411 |
| | Редколесная (Vrd)/Redkolesnaya | | 2382–2422 | – | 2411–2453 |
| | Мошаконская (Vms)/Moshakovskaya | | 2422–2486 | – | 2453–2526 |
| | Чистяковская (Vcs)/Chistyakovskaya | | 2486–2598 | – | 2526–2632 |
| | Алешинская (Val)/Aleshinskaya | | 2598–2894 | – | 2632–2752 |
| Рифейская Riphean | Джурская (R ₃)/Dzhurskaya | Рифейский Riphean | 2894–2990 | – | 2752–2858 |
| | Красногорская (R ₃)/Krasnogorskaya | | 2990–3011 | – | 2858–3006 |
| Ангарский комплекс (βT ₁)/Angara complex Слабодифференцированные интрузии, силлы, неправильные тела долеритов Poorly differentiated intrusions, sills, irregular dolerites bodies | | | | | |
| Верхняя часть разреза/Upper part of the section | | | Имб-180 | Имб-1 | Имб-2 |
| 0–185 | | | 1632–1785 | 1743–1859 | 1560–1835 |

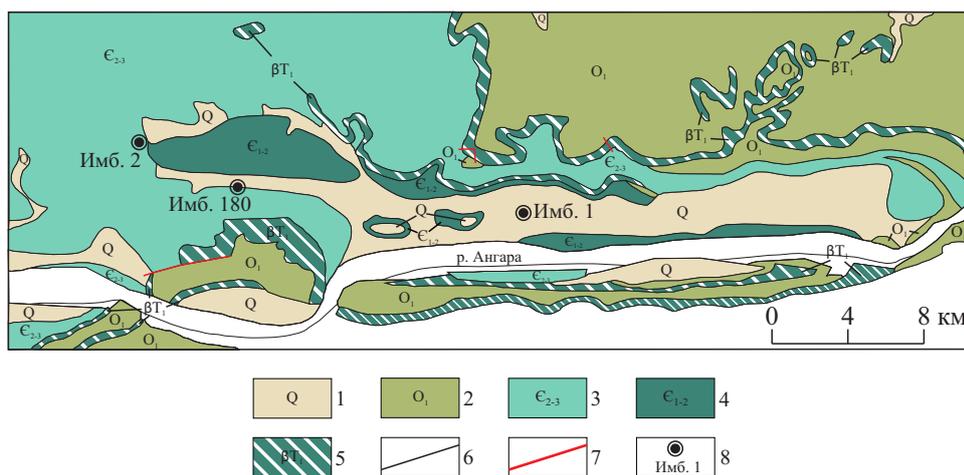


Рис. 2. Геологическая карта (по А.Е. Березий и Г.Ф. Борзенко, 1967): 1) четвертичная система; 2) нижний ордовик в составе ийской и усть-кутской свит; 3) средний–верхний кембрий в составе эвенкийской свиты; 4) нижний–средний кембрий в составе ангарской свиты; 5) Ангарский комплекс: слабодифференцированные интрузии, силлы, неправильные тела долеритов; 6) геологические границы; 7) тектонические нарушения; 8) скважины

Fig. 2. Geological map (by A.E. Bereziy, G.F. Borzenko, 1967): 1) quaternary system; 2) lower ordovician in Iiskaya and Ust-kutskaya strata; 3) middle–upper Cambrian in Evinkiyskaya strata; 4) lower–middle Cambrian in Angarskaya strata; 5) Angara complex: poorly differentiated intrusions, sills, irregular dolerite bodies; 6) geological boundaries; 7) tectonic disturbances; 8) wells

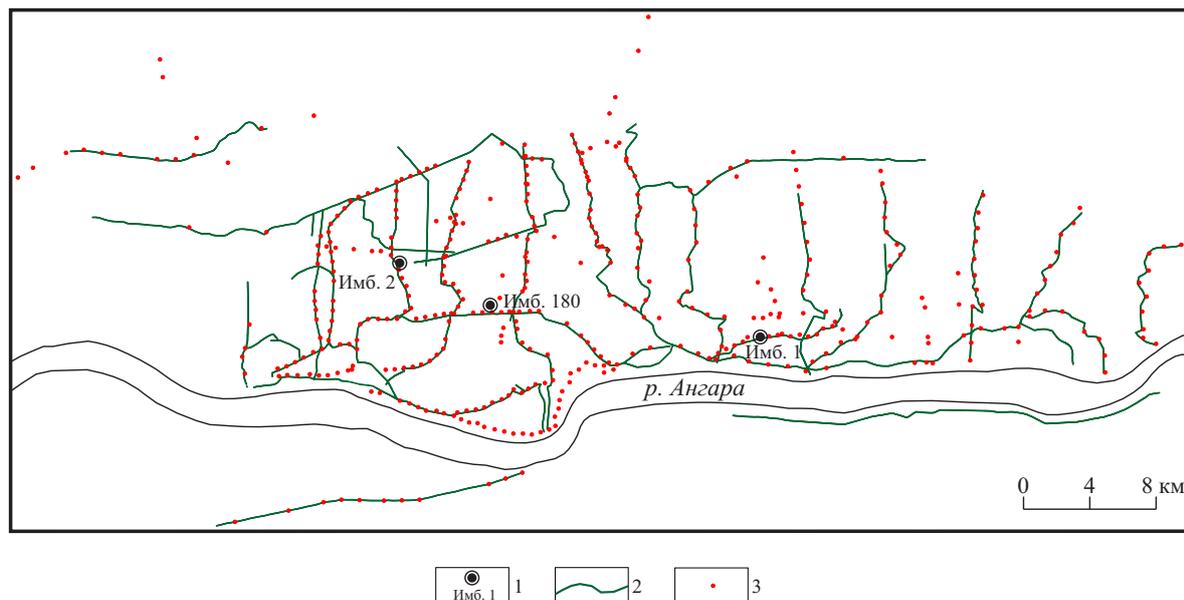


Рис. 3. Карта с положением профилей магнитной съемки и точек литохимического опробования: 1) скважины; 2) профили магнитной съемки; 3) точки отбора литохимических проб

Fig. 3. Map with the position of magnetic survey profiles and points of lithochemical sampling: 1) wells; 2) magnetic survey profiles; 3) lithochemical sampling points

Литохимические исследования

Обработка и интерпретация литохимических данных при выделении эпигенетических аномалий, обусловленных влиянием скоплений нефти и газа, предполагает решение постоянной группы задач, связанных с существенным влиянием мешающих природных факторов.

Известна связь уровней накопления большинства химических элементов с гранулометрическим составом осадочных отложений, которая выражается в их преимущественном накоплении в пелитовом веществе по сравнению с псаммитовым [55]. Эта закономерность также правомерна для терригенных образований Имбинской площади. На дневной поверхности территории съемки обнажаются отложения кембрийской, ордовикской и четвертичных систем, принадлежащие различным плитным структурным подъярусам. Геодинамические обстановки осадконакопления сказываются на степени гомогенизации осадочного материала, определяют его источники и направления сноса, что также влияет на минеральный состав и уровни накопления химических элементов. Весьма ярко на фоне геохимических характеристик терригенных отложений верхней части разреза по содержанию группы химических элементов выделяются участки, где почвообразующими породами являются интрузии основного состава (рис. 3). Учитывая то, что в таких местах высокие концентрации характерны и для компонентов, способных выступать индикаторами залежей углеводородов, при математической обработке этому моменту уделялось особое внимание. В частности, принадлежность проб к областям развития коры выветривания по телам долеритов идентифицировалась с

привлечением геологической (геологические границы тел долеритов) и топографической (повышенные формы рельефа) карт, а также данных гамма-радиометрии (МЭД ≤ 6 мкР/ч).

Существенные отклонения средних содержания ряда элементов, связанные с литолого-стратиграфическим фактором, учитывались путем перехода к коэффициентам концентрации химических элементов, рассчитанных внутри выборочных совокупностей, сформированных по этому признаку.

Во вводной части данной статьи обращалось внимание на то, что у различных авторов указывается на способность порядка двадцати химических элементов формировать аномалии в областях эпигенетического воздействия скоплений нефти и газа. При этом спектр элементов-индикаторов непостоянен для разных континентов и ландшафтных обстановок значительно удаленных друг от друга территорий. Поэтому при литохимических поисках нефти и газа, учитывая вариативность геологических причин возникновения аномалий, всегда существует проблема выбора наиболее информативных элементов и расчетных показателей, указывающих на наличие углеводородных залежей.

В условиях, когда перечень элементов-индикаторов поискового объекта достаточно четко не определен, нами часто используются показатели дисперсии (ДГС) и вариации геохимического спектра (ВГС) проанализированных элементов [56]:

$$\text{ДГС} = \frac{\sum (kk_i - 1)^2}{N - 1};$$

$$\text{ВГС} = \frac{\sqrt{\text{ДГС}_{(1)}}}{kk} \cdot 100 \%,$$

где kk_i – коэффициент концентрации i -элемента в геологических образованиях; – средняя величина коэффициентов концентрации элементов в данных образованиях; N – количество проанализированных элементов.

Заложенный в расчет этих показателей эффект аккумуляции отклонений содержаний всех проанализированных химических элементов от фонового уровня индивидуально для каждой пробы делает их весьма эффективным инструментом выявления слабо проявленных литохимических аномалий.

Однако, в случае многовариантности причин возникновения сопоставимых по амплитуде аномалий химических элементов, выявленные литохимические неоднородности требуют дополнительного анализа. Хорошим примером подобной ситуации является геохимическое поле Имбинской площади. В частности, математический анализ массива литохимических данных методом главных компонент показал, что значимую нагрузку (нагрузка $\geq 0,7$) оказывает только первый фактор, а коррелирующие с ним элементы включают в свой спектр и те, которые концентрируются в долеритах (рис. 4). То есть, даже после ввода (принятия) поправок на литолого-стратиграфическую неоднородность горизонта опробования наибольший вклад в математически объясненную дисперсию геохимического поля вносят химические элементы, чьи повышенные концентрации в грунтах с высокой степенью вероятности будут определяться наличием интрузивных образований.

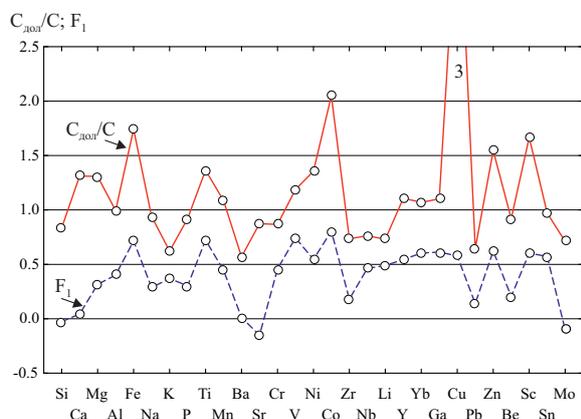


Рис. 4. Графики значений факторной нагрузки первого фактора (F_1) и отношения среднего содержания химических элементов в литохимических пробах в местах выходов долеритов к их среднему содержанию в подпочвенных терригенных образованиях Имбинской площади ($C_{\text{дол}}/C$)

Fig. 4. Graphs of factor loading values of the first factor (F_1) and the ratios of the average content of chemical elements in lithochemical samples in dolerite output points to the average content of the rest stratigraphic differences ($C_{\text{дол}}/C$)

Изучение особенностей концентрирования химических элементов в пробах, характеризующихся значениями показателя ВГС ≥ 50 %, позволило

выделить несколько специализированных групп (табл. 2).

Таблица 2. Геохимическая специализация литохимических проб (выборка с ВГС ≥ 50 %)

Table 2. Geochemical specialization of lithochemical samples (sampling with geochemical spectrum variation ≥ 50 %)

| Номер группы Group number | Геохимический ряд, ранжированный по значениям коэффициентов концентрации ($KK \geq 1,5$) Geochemical series ranked by concentration coefficient values ($KK \geq 1,5$) | Количество проб Sample amount |
|------------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Ca (2,5); Li (2,0); Mg (1,9); K (1,5) | 21 |
| 2 | Cu (1,9); Ni (1,7); Ti (1,5); Co (1,5) | 14 |
| 3 | Ca (3,4); Cu (2,7); Sc (1,9); Mg (1,8); Li (1,8); Ni (1,6) | 10 |
| 4 | Cr (3,0); Zr (1,6) | 2 |
| 5 | Дефицит содержания большинства проанализированных элементов Deficiency of the content of the elements analyzed | 6 |

Примечание: в скобках приведены средние значения коэффициента концентрации.

Note: average values of the concentration coefficient are given in brackets.

Первая группа, объединяющая литофильные щелочные и щелочноземельные металлы, за исключением кальция и магния, не проявляет склонность к увеличению уровней накопления в грунтах Имбинской площади на участках выхода тел долеритов (рис. 2). Калий и кальций входит в состав породообразующих минералов, относительный рост содержания которых в осадочных породах является характерным для областей эпигенетического влияния залежей нефти и газа [5, 6, 14, 36].

Вторая группа включает литофильные, халькофильные и сидерофильные элементы, высокие содержания которых характерны для местных интрузивных образований.

По особенностям геохимического спектра выделяется третья ассоциация смешанной специализации, представленная элементами первой и второй групп.

Появление двух единичных проб с высоким содержанием хрома и циркония видимо обусловлено наличием локальных геологических неоднородностей.

Высокие значения показателя ВГС для пятой группы связаны с относительно низкими значениями концентраций всех проанализированных элементов и характерны для существенно опесчаненных отложений в пределах отдельных возвышенных форм рельефа.

Особенности локализации проб с высокой вариацией геохимического спектра и их геохимическая специализация позволяют говорить, что аномальные изменения геохимического поля, связанные с залежами углеводородов, с наибольшей степенью вероятности проявляются в процессах концентрирования химических элементов первой

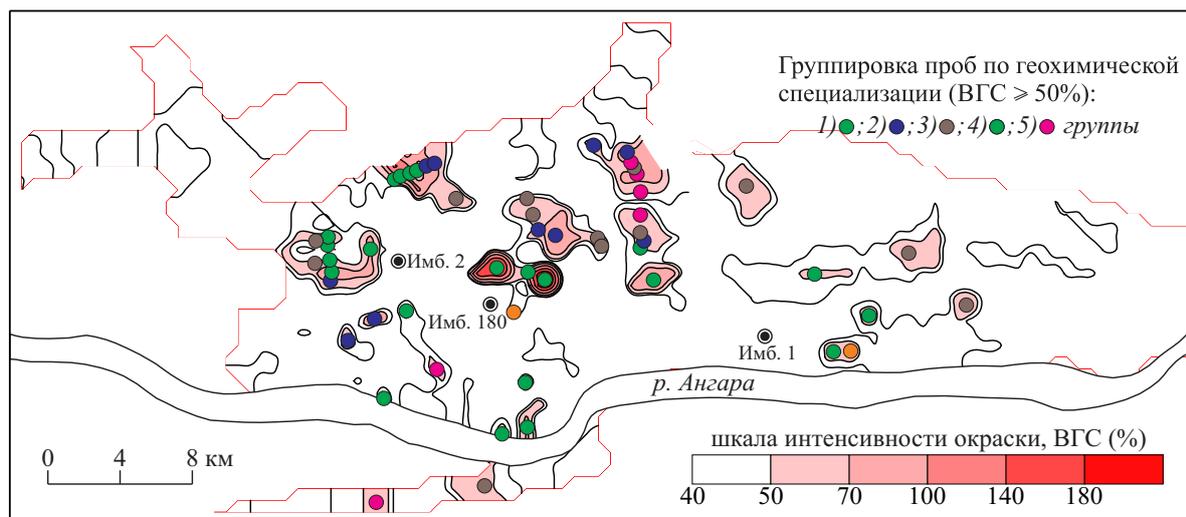


Рис. 5. План изолиний показателя вариации геохимического спектра

Fig. 5. Plan of isolines of geochemical spectrum variation index

группы. Аномалии этой группы располагаются по периферии области, близко совпадающей с положением антиклинальной структуры по отражающему горизонту Б, намечая контрастную субкольцевую аномалию в районе скважины Имп-2 (рис. 5). Участки высокой ВГС, сформированные пробами второй и третьей группы, проявляют тенденцию пространственной близости с выходящими на поверхность силами долеритов.

Магнитометрические исследования

Основная сложность применения магнитной съемки при поисках месторождений нефти и газа заключается в том, что вторичное образование минералов железа происходит в осадочном чехле, который оказывает существенно меньшее влияние на магнитное поле по сравнению с породами фундамента. На сегодняшний день большинство исследователей, занимающихся этим вопросом, склоняются к тому, что основную поисковую информацию несет высокочастотная составляющая магнитного поля, в большей мере отражающая пространственную дифференциацию слабоманитных свойств пород верхней части разреза [20, 23, 26, 32].

Разделение магнитного поля на составляющие пород фундамента и осадочного чехла в основном осуществляется способами полосовой фильтрации [23, 26, 27, 57, 58]. Так, в геологических условиях Западно-Сибирской плиты для выявления влияния пород фундамента на магнитное поле достаточно процедуры математического осреднения в скользящем окне с подобранными параметрами [26].

Особенностью Сибирской платформы является повсеместное наличие в осадочном разрезе тел продуктов магматизма основного состава, которые существенно влияют на показания магнитных данных. Из-за этого возникает необходимость исключения влияния на магнитное поле не только соста-

вляющей от фундамента, но и компоненты, связанной с телами интрузивов и эффузивов, локализованных на различных стратиграфических уровнях.

Поскольку магматические образования преимущественно залегают субгоризонтально, также целесообразно применять способы полосовой фильтрации.

Из-за различной мощности высокомагнитных интрузивных образований и их глубины залегания окно фильтрации должно изменяться в зависимости от этих параметров. Поэтому было принято решение расчет остаточного магнитного поля осуществить по способу, предложенному Свендом Саксовым и Куртом Нигардом [59]. Достоинством этого способа является возможность изменять окно осреднения по двум параметрам. По методу Саксова–Нигарда остаточное магнитное поле на точке профиля определяется как разность между средними значениями поля по двум концентрическим окружностям, центр которых находится в точке расчета, нормированная на разность двух радиусов:

$$F(\Delta T) = \frac{\Delta T(r_1) - \Delta T(r_2)}{r_1 - r_2},$$

где $\Delta T(r_1)$, $\Delta T(r_2)$ – среднее значение магнитного поля на окружностях радиусами r_1 и r_2 .

Осреднение по малой окружности радиуса r_2 проводилось для того, чтобы на дальнейшие вычисления влияние случайной ошибки в центральной точке было минимальным. Радиус r_1 выбирался в зависимости от глубины интересующего нас интервала. Оценка глубины локализации магматических образований проводилась нами по априорным геологическим данным. В работе [60] показано, что лучше всего, когда центр этого интервала соответствует глубине Z (в нашем случае центр интервала локализации интрузивов), равной

$$Z = r_1 + r_2.$$

Для разделения магнитного поля на частотные составляющие трансформанты магнитного поля были рассчитаны двумя способами.

Двумерный вариант метода Саксова–Нигарда применялся для выделения высокоамплитудных низкочастотных магнитных аномалий. Благодаря тому, что окно осреднения получалось большим во всех точках, это также позволило выделить низкочастотную составляющую пород фундамента. Высокочастотные микроаномалии магнитного поля в этом варианте расчета значительно затухают. При дальнейшем расчете стандартного отклонения остаточного магнитного поля области развития магматических пород характеризуются аномально высокими значениями трансформант.

Для выделения высокочастотных микроаномалий магнитного поля остаточное поле рассчитывалось как разность наблюдаемого и осредненного (окно осреднения 150 м (7 точек)) магнитных полей. Размер линейного окна осреднения позволил учитывать локальные компоненты магнитного поля, обусловленные верхней частью разреза. Но, как показывает анализ, вместе с этим сохранилось и влияние низкочастотных высокоамплитудных аномалий, вызванных сильномагнитными магматическими породами.

Оценка неоднородности разностного магнитного поля посредством расчета стандартного отклонения в скользящем окне продемонстрировала, что области высоких значений этого показателя создают пространственно локализованные аномалии, приуроченные как к участкам прогнозируемых эпигенетических изменений в верхней части разреза, так и к ранее выделенным аномалиям, отождествляемым с телами долеритов.

Чтобы разделить аномалии по их генезису из стандартного отклонения магнитного поля, рассчитанного вторым путем, было вычтено стандартное отклонение, рассчитанное по методу Саксова–Нигарда. Предварительно данные стандартного отклонения магнитного поля, рассчитанного

двумя способами, были приведены к одному уровню. В результате вычисления разностного дисперсионного параметра области локализации эпигенетических образований характеризуются высокими положительными значениями, а зоны расположения магматических пород создают отрицательные аномалии.

По результатам расчета разницы стандартного отклонения магнитного поля была построена итоговая карта (рис. 6). Положительные аномальные зоны разностного дисперсионного параметра, картирующего области эпигенетических преобразований, пространственно коррелируют с данными литохимических исследований.

Заключение

Широкое распространение продуктов триасового магматизма в геологическом разрезе Сибирской платформы является весомым фактором влияния на характеристики магнитного и приповерхностного литохимического поля. При использовании методов магнитометрии и литохимии для поисков залежей углеводородов без учета этой особенности существенно повышается риск выделения «ложных», не связанных с вторичными преобразованиями, аномалий. Обсуждаемые в статье процедуры обработки и интерпретации магнитных и литохимических данных могут использоваться как вариант идентификации областей вторичных эпигенетических изменений минерального состава в геологических условиях Сибирской платформы. Для магнитной съемки важно наличие информации о глубинах интервалов локализации магнитовозмущающих объектов с целью корректного подбора параметров фильтрации. Основные поисковые критерии выделения эпигенетических аномалий удается получить не по абсолютным значениям измеряемых параметров, а используя характеристику их рассеяния. По пространственному взаимоотношению эпигенетических магнитных и литохимических аномалий залежи газа Имбинская площадь

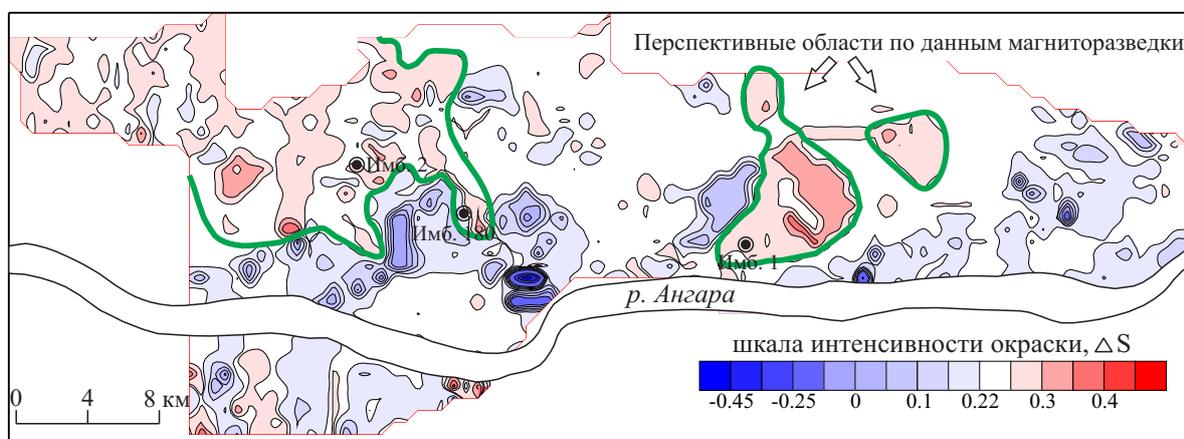


Рис. 6. План изолиний разностного дисперсионного параметра (ΔS)

Fig. 6. Plan of isolines of differential disperse parameter (ΔS)

схожа с углеводородными скоплениями в антиклинальных ловушках различных регионов мира. В таких случаях аномальные отклонения в виде повышенной дисперсии высокочастотной составляющей

магнитного поля фиксируются в контуре нефтеегазоносности, а геохимические неоднородности тяготеют к области влияния водоуглеводородных контактов, формируя эффект «галло».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений / А.А. Карцев и др. – М.: Гостоптехиздат, 1954. – 430 с.
2. Rosaire E.E. A perspective of exploration for petroleum // *Geophysics*. – 1940. – V. 5. – № 3. – P. 259–271.
3. Groth P.K., Groth L.W. Bibliography for surface and near-surface hydrocarbon prospecting methods. – Denver, Groth Geochemistry Services (for the Association of Petroleum Geochemical Explorationists), 1994. – 143 p.
4. Березкин В.М., Киричек М.А., Кунарев А.А. Применение геофизических методов разведки для прямых поисков месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 1978. – 223 с.
5. Литогеохимические исследования при поисках месторождений нефти и газа / под ред. О.Л. Кузнецова. – М.: Недра, 1987. – 184 с.
6. Физико-химические основы прямых поисков залежей нефти и газа / под ред. Е.В. Каруса. – М.: Недра, 1986. – 336 с.
7. Boleneus D. Guidelines for surface geochemical surveying // *Oil and Gas Journal*. – 1994. June 6. – P. 59–64.
8. Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments / Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams // *Hydrocarbon migration and its near surface expression. The American Association of Petroleum Geologists Memoir*. – 1996. – V. 66. – P. 71–89.
9. Saunders D.F., Burson K.R., Tompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1999. – V. 83. – № 1. – P. 170–185.
10. Sikka D.B., Shives R.B.K. Radiometric surveys of the Redwater oil field, Alberta: Early surface exploration case histories suggest mechanisms for the development of hydrocarbon-related geochemical anomalies, in Surface exploration case histories / Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing / Eds. D. Schumacher, L.A. LeSchack // *The American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology* № 48 and *SEG Geophysical References Series*. – 2002. – № 11. – P. 243–297.
11. Славин П.С. О почвенно-геохимическом методе поисков нефти // Геохимические методы поисков нефти и газа. – М.: Гостоптехиздат, 1953. – С. 15–42.
12. Применение геохимических полей распределения микроэлементов для оценки нефтеегазоносности малоизученных площадей Юрубчено-Тохомской зоны А.И. Сурнин, А.И. Ларичев, Ю.Г. Гладкий, Г.Е. Полякова, А.С. Черевко // *Геохимия*. – 2003. – № 10. – С. 1133–1136.
13. Дорогокупец Т.И., Романкевич М.Е. О связи Eh и pH перекрывающих пород с нефтеегазоносностью подстилающих отложений // *Научно-методические основы и опыт использования геохимических методов поисков месторождений нефти и газа*. – М.: ВНИИЯГТ, 1985. – С. 79–81.
14. Процессы формирования аномальных литогеохимических эффектов над месторождениями углеводородов / А.В. Петухов, Т.И. Дорогокупец, О.В. Зверева, И.С. Капина. – М.: ВНИИ Геоинформсистем, 1988. – 24 с.
15. Якимов А.С., Швыдкий Э.К., Вассерман В.А. Новые представления о формировании естественных электрических полей углеводородных залежей // *Геология нефти и газа*. – 2007. – № 1. – С. 39–45.
16. Pirson S.J. Oil is confined in the Earth by redox potential barriers // *Oil and Gas Journal*. – 1980. – V. 76. – № 27. – P. 152–161.
17. Еремин В.Н. Магнитная зональность осадочных пород и пространственное распределение минералов железа в зонах влияния углеводородов // *Геология нефти и газа*. – 1986. – № 4. – С. 28–32.
18. Foote R.S. Relationship of near-surface magnetic anomalies to oil- and gas-producing areas / Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams // *Hydrocarbon migration and its nearsurface expression. The American Association of Petroleum Geologists Memoir*. – 1996. – V. 8. – P. 111–126.
19. Elmore R.D., McCollum R., Engle M.H. Evidence of a relationship between hydrocarbon migration and diagenetic magnetic minerals – implications for petroleum exploration // *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*. – 1989. – V. 5. – P. 1–17.
20. Reynolds R.L., Fishman N.S., Hudson M.R. Sources of aeromagnetic anomalies over Cement oil field (Oklahoma), Simpson oil field (Alaska) and Wyoming-Igano-Utah thrust belt // *Geophysics*. – 1995. – V. 56. – № 5. – P. 606–617.
21. McCabe C., Sassen R., Saffer B. Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil // *Geology*. – 1987. – V. 15. – P. 7–10.
22. Machel H.G., Burton E.A. Chemical and microbial processes causing anomalous magnetization in environments affected by hydrocarbon seepage // *Geophysics*. – 1991. – V. 56. – P. 598–605.
23. Pirson S.J. Computerised magnetoelectric exploration-case history: Giddings field in Texas // *Oil and Gas Journal*. – 1978. – V. 76. – № 25. – P. 168–178.
24. Machel H.G. Magnetic contrasts as a result of hydrocarbon seepage and migration / Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams // *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: The American Association of Petroleum Geologists Memoir*. – 1996. – V. 66. – P. 99–109.
25. Каштанов В.А. Локальный нефтепрогноз по данным аэромагнитной съемки // *Геология нефти и газа*. – 1998. – № 12. – С. 7–12.
26. Меркулов В.П. Магнитные поля месторождений нефти и газа и возможности их использования при картировании залежей углеводородов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 218–224.
27. Relationship between magnetic anomalies and hydrocarbon microseepage above the Jingbian gas field, Ordos basin, China / Q. Liu, L. Chan, Q. Liu, H. Li, F. Wang, S. Zhang, X. Xia, T. Cheng // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 2004. – V. 88. – № 2. – P. 241–251.
28. Donovan T.J., Forgey R.L., Roberts A.A. Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1979. – V. 63. – P. 245–248.
29. Low-Altitude aeromagnetic reconnaissance for petroleum in the Atctic National Wildlife Refuge, Alaska / T.J. Donovan, J.D. Hendricks, A.A. Roberts, P.T. Eliason // *Geophysics*. – 1994. – V. 49 (8). – P. 1338–1353.
30. Wollleben J.A., Greenle D.W. Successful application of micro-magnetic data to focus hydrocarbon exploration, in Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing / Eds. D. Schumacher, L.A. LeSchack // *The American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology* № 48 and *SEG Geophysical References Series*. – 2002. № 11. – P. 175–191.
31. Aldana M., Costanzo-Alvarez V., D'az M. Magnetic and mineralogical studies to characterize oil reservoirs in Venezuela Magnet-

- ic and mineralogical studies to characterize oil reservoirs in Venezuela // *The Leading Edge*. – 2003. – V. 22 (6). – P. 526–529.
32. Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field, Jiangnan Basin, China / Q. Liu, Q. Liu, L. Chan, T. Yang, X. Xia, T. Cheng // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2006. – V. 53. – № 1–2. – P. 25–33.
 33. Donovan T.J. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma – evidence and mechanisms // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. – 1974. – V. 58. – P. 429–446.
 34. Al-Shaieb Z., Cairns J., Puckette J. Hydrocarbon induced diagenetic aureoles: Indicators of deeper leaky reservoirs // *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*. – 1994. – V. 10. – P. 24–48.
 35. Goldhaber M.B., Reynolds R.L. Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from south Texas coastal plain // *Geophysics*. – 1991. – V. 56. – P. 748–757.
 36. Малюшко Л.Д., Коробов Ю.И. Метод ДГМ (диагностики генезиса минералов) – эффективный физико-химический способ локального прогноза залежей УВ при прямых поисках нефти и газа // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2006. – № 7. – С. 45–50.
 37. Khan S.D., Jacobson S., Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages // *Geological Society of America Bulletin*. – 2008. – V. 120. – № 1/2. – P. 96–105.
 38. Petrovic A., Khan S.D., Thurmond A.K. Integrated hyperspectral remote sensing, geochemical and isotopic studies for understanding hydrocarbon-induced rock alterations // *Marine and Petroleum Geology*. – 2012. – V. 35. – P. 292–308.
 39. Алексеев Ф.А. Радиометрический метод поисков нефти, состояние метода и опыт его применения // *Разведка и разработка полезных ископаемых*. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – С. 51–56.
 40. Tedesco S.A. *Surface Geochemistry in Petroleum Exploration*. – New York: Chapman & Hal, 1995. – 256 p.
 41. Duchscherer Jr W. *Geochemical Hydrocarbon Prospecting*. – Tulsa, OK: Pennorthwestell Publ. Co., 1984. – 278 p.
 42. Geochemical evidences of trace metal anomalies for finding hydrocarbon microseepage in the petroliferous regions of the Tataraka and Pasarlapudi areas of Krishna Godavari Basin, India / M.A. Rasheed, M. Lakshmi, P.L.S. Rao, M.S. Kalpana, A.M. Dayal, D.J. Patil // *Petroleum Science*. – 2013. – V. 10. – № 1. – P. 19–29.
 43. Application of trace metal anomalies for recognition of petroleum prospects in surface sediments of Kutch and Saurashtra Basins, India / B.A. Radha, P.L. Srinivasa, M.A. Rasheed, D.J. Patil, A.M. Dayal // *Journal Geological Society of India*. – 2012. – V. 80. – P. 802–812.
 44. Correlation of trace elements with hydrocarbon microseepage / P.L. Srinivasa, D. Srinu, M.A. Rasheed, M.S. Kalpana, D.J. Patil, A.M. Dayal // *Journal Geological Society of India*. – 2013. – V. 82. – P. 666–674.
 45. Глубинное минерогенетическое изучение территорий комплексом современных методов геохимии и геофизики / С.Г. Алексеев, С.А. Вешев, Н.А. Ворошилов, Е.Г. Маргович, М.Б. Штокаленко // *Разведка и охрана недр*. – 2011. – № 12. – С. 40–48.
 46. Соболев И.С. О возможности изучения элементного состава снегового покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопроисковый аспект) // *Геология нефти и газа*. – 2013. – № 1. – С. 68–77.
 47. Закономерности формирования и распределения геофизических и геохимических полей / Л.М. Зорькин, Е.В. Карус, Л.С. Кондратов, О.Л. Кузнецов, А.В. Петухов, Г.В. Рогоцкий, В.Г. Чахмачев, И.А. Чиркин, В.Г. Тыминский // *Советская геология*. – 1978. – № 1. – С. 94–104.
 48. Игнатов А.П., Бровчук И.Ф., Бородин В.А. Ртуть – индикатор углеводородов при геохимических поисках нефти и газа // *Докл. АН СССР*. – 1989. – Т. 306. – № 2. – С. 443–447.
 49. Sun Z., Xie X. Nationwide oil and gas geochemical exploration program in China // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – V. 139. – P. 201–206.
 50. The use of iodine in geochemical exploration for hydrocarbons / S. Alexan, J. Fausnaugh, C. Goudge, S. Tedesco // *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*. – 1986. – V. 2. – P. 49–72.
 51. Tedesco S.A., Goudge C.K. Application of iodine surface geochemistry in the Denver-Julesburg Basin // *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*. – 1989. – V. 5. – P. 71–83.
 52. Носкова Е.С. Морфология интрузий траппов Байкитской антеклизы (Сибирская платформа) и их возможное влияние на нефтегазоносность // *Матер. конф. 2-е Яншинские чтения*. – М., 2002. – С. 107–110. URL: <http://geo.web.ru/tectonics/yanshin/chart2/10/index.html> (дата обращения: 14.01.2015).
 53. Присяяно-Енисейская синеклиза – объект газопоисковых работ на юго-западе Сибирской платформы / Н.В. Мельников, А.С. Ефимов, Е.В. Смирнов, Г.Д. Назимков, Л.В. Медюхина // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2010. – № 2. – С. 13–20.
 54. Особенности проведения радиогеохимической съемки при поисках месторождений нефти и газа в условиях Сибирской платформы (на примере Имбинской площади) / И.С. Соболев, Л.П. Рихванов, В.И. Олешко, И.Н. Лебедянский // *Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края: Матер. докл. науч. конф.* – Красноярск, 2003. – С. 115–121.
 55. Гавшин В.М. Радиогеохимическая специфика крупных осадочных бассейнов Западной и Средней Сибири // *Геология и радиогеохимия Средней Сибири*. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 173–192.
 56. Поцелуев А.А., Быстров И.И., Гаврилов Р.Ю. Показатели дисперсии и вариации геохимического спектра как критерии неоднородности геохимического поля // *Прикладная геохимия: сб. статей*. – М.: Изд-во ИМГРЭ, 2002. – Вып. 3. – С. 419–428.
 57. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
 58. Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic Tilt-Depth method / A. Salem, S. Williams, E. Samson, D. Fairhead, D. Ravat, R.J. Blakely // *Exploration Geophysics*. – 2010. – V. 41. – № 3. – P. 198–209.
 59. Saxov S., Nygaard K. Residuals Anomalies and Depth Estimation // *Geophysics*. – 1953. – V. 18. – № 4. – P. 913–928.
 60. Сажина И.Б. Интерпретация гравиметровой съемки в Крымском и Абинском районах Краснодарского края // *Прикладная геофизика*. – 1957. – Т. 17. – С. 203–210.

Поступила 06.02.2015 г.

UDC 550.8.053: 550.84.094.2

FEATURES OF PROCESSING AND INTERPRETATION OF MAGNETIC AND LITHOCHEMICAL DATA WHILE EXPLORING OIL AND GAS FIELDS IN SIBERIAN PLATFORM CONDITIONS (BY THE EXAMPLE OF IMBINSKAYA GAS-BEARING AREA)

Igor S. Sobolev,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E mail: geolsob@yandex.ru

Nikolay P. Bredikhin,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E mail: bnp1991@mail.ru

Vitaliy P. Merkulov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E mail: merkulovvp@hw.tpu.ru

Aleksandr N. Orekhov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E mail: orekhovan@mail.tomsknet.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to develop the effective ways of processing and approaches to interpretation of magnetic and lithochemical data in the search for hydrocarbon deposits in geological conditions of the Siberian platform. One of the features of Siberian platform geological section is the extensive development of products of late Permian-Triassic basaltic magmatism. Against the background of sedimentary formations the effusive rocks and intrusive bodies of the basic structure are differentiated by sharp differences in magnetic properties and levels of accumulation of some chemical elements. In general, the areas of epigenetic influence of hydrocarbon deposits are characterized by high contrast in the change of chemical elements content and magnetic characteristics of sedimentary sequence. Rocks of trap formation contribute significantly to the fluctuations of magnetic field and geochemical anomalies and form their own ones, preventing isolation and identification of magnetic and lithochemical irregularities associated with oil and gas accumulations. Therefore, the application of the developed procedures for oil and gas areas with purely terrigenous cover for processing magnetic and lithochemical data requires the changes in division anomalies of epigenetic and magmatic origin.

The main aim of the research is to develop the algorithm for processing magnetic and lithochemical data to allocate the areas of epigenetic influence of hydrocarbon accumulations in conditions of wide development of products of the Triassic magmatism in Siberian platform.

Research methods. *The authors have used the results of high-resolution magnetic survey and lithochemical sampling of surface sediments in Imbinskaya gas-bearing area of the Angara folds area.*

Results. *The authors developed special procedures when applying bandpass filtering of magnetic data by the method of Saxov-Nygaard and differentiating lithochemical field by indicators of dispersion and variance of geochemical spectrum for identification of anomalous variations caused by the influence of dolerite bodies.*

Key words:

Magnetic survey, lithochemical samples, trap magmatism, hydrocarbon deposits, bandpass filtering, geochemical spectrum.

REFERENES

1. Kartsev A.A. *Geokhimicheskie metody poiskov i razvedki neftyanikh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geochemical methods of prospecting and exploration of oil and gas fields]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1954. 430 p.
2. Rosaire E.E. A perspective of exploration for petroleum. *Geophysics*, 1940, vol. 5, no. 3, pp. 259 – 271.
3. Groth P.K., Groth L.W. *Bibliography for surface and near-surface hydrocarbon prospecting methods*. Denver, Groth Geochemistry Services (for the Association of Petroleum Geochemical Explorationists), 1994. 143 p.
4. Brezkin V.M., Kirichek M.A., Kunarev A.A. *Primenenie geofizicheskikh metodov razvedki dlya pryamykh poiskov mestorozhdeniy nefti i gaza* [Application of geophysical exploration methods for direct exploration of oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 223 p.
5. *Litogeokhimicheskie issledovaniya pri poiskakh mestorozhdeniy nefti i gaza* [Lithochemical research in the search for oil and gas]. Ed. by O.L. Kuznetsov. Moscow, Nedra Publ., 1987. 184 p.
6. *Fiziko-khimicheskie osnovy pryamykh poiskov zalezhey nefti i gaza* [Physical-chemical basis of direct exploration of oil and gas]. Ed. by E.V. Karus. Moscow, Nedra Publ., 1986. 336 p.
7. Boleneus D. Guidelines for surface geochemical surveying. *Oil and Gas Journal*, 1994, June 6, pp. 59–64.
8. Schumacher D. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. *Hydrocarbon migration and its near surface expression: The American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1996, vol. 66, pp. 71–89.
9. Saunders D.F., Burson K.R., Tompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1999, vol. 83, no. 1, pp. 170–185.
10. Sikka D.B., Shives R.B.K. Radiometric surveys of the Redwater oil field, Alberta: Early surface exploration case histories suggest mechanisms for the development of hydrocarbonrelated geochemical anomalies, in Surface exploration case histories, Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. Eds. D. Schumacher, L.A. LeSchack. *The American Association of Pet-*

- roleum Geologists Studies in Geology no. 48 and SEG Geophysical References Series*, 2002, no. 11, pp. 243–297.
11. Slavin P.S. O pochvenno-geokhimicheskom metode poiskov nefti [Geochemical methods of oil and gas exploration]. *Geokhimicheskie metody poiskov nefti i gaza* [Geochemical techniques for oil and gas exploration]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1953. pp. 15–42.
 12. Surnin A.I., Larichev A.I., Gladkiy Yu.G., Polyakova G.E., Che-revko A.S. Primenenie geokhimicheskikh poley raspredeleniya mikroelementov dlya otsenki neftegazonnosti maloizuchennykh ploshadey Yurubcheno-Tokhomskoi zony [Application of geochemical fields of distribution of trace elements to assess oil and gas potential of poorly known areas in Yurubcheno-Tokhomskaya zone]. *Geochemistry International*, 2003, no. 10, pp. 1133–1136.
 13. Dorogokupets T.I., Romankevich M.E. O svyazi Eh i Ph perekryvayushchikh porod s neftegazonnostyu podstilayushchikh otlozheniy. *Nauchno-metodicheskie osnovy i opyt ispolzovaniya geokhimicheskikh metodov poiskov mestorozhdeniy nefti i gaza* [On the relationship between Eh and pH overburden with oil-gas deposits underlying. Scientific-methodical bases and experience in the use of geochemical methods of prospecting for oil and gas]. Moscow, VNIYaGG Publ., 1985. pp. 79–81.
 14. Petukhov A.V., Dorogokupets T.I., Zvereva O.V., Kapina I.S. *Protsessy formirovaniya anomalnykh litogeokhimicheskikh effektiv nad mestorozhdeniyami uglevodorodov* [Processes of formation of anomalous lithochemical effects above hydrocarbon deposits]. Moscow, VNIgeoinformatsion Publ., 1988. 24 p.
 15. Yakimov A.S., Shvydkiy E.K., Vasserman V.A., Novye predstavleniya o formirovani estestvennykh elektricheskikh poley uglevodorodnykh zalezhey [New ideas on formation of natural electric fields of hydrocarbon deposits]. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, no. 1, pp. 39–45.
 16. Pirson S.J. Oil is confined in the Earth by redox potential barriers. *Oil and Gas Journal*, 1980, vol. 76, no. 27, pp. 152–161.
 17. Eremin V.N. Magnitnaya zonalnost osadochnykh porod i prostranstvennoe raspredelenie mineralov zheleza v zonakh vliyaniya uglevodorodov [Magnetic zoning of sedimentary rocks and spatial allocation of iron minerals in the areas of influence of hydrocarbons]. *Russian Geology and Geophysics*, 1986, no. 4, pp. 28–32.
 18. Foote R.S. Relationship of near-surface magnetic anomalies to oil- and gas-producing areas. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: The American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1996, vol. 8, pp. 111–126.
 19. Elmore R.D., McCollum R., Engle M.H. Evidence of a relationship between hydrocarbon migration and diagenetic magnetic minerals – implications for petroleum exploration. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, 1989, vol. 5, pp. 1–17.
 20. Reynolds R.L., Fishman N.S., Hudson M.R. Sources of aeromagnetic anomalies over Cement oil field (Oklahoma), Simpson oil field (Alaska) and Wyoming-Igano-Utah thrust belt. *Geophysics*, 1995, vol. 56, no. 5, pp. 606–617.
 21. McCabe C., Sassen R., Saffer B. Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil. *Geology*, 1987, vol. 15, pp. 7–10.
 22. Machel H.G., Burton E.A. Chemical and microbial processes causing anomalous magnetization in environments affected by hydrocarbon seepage. *Geophysics*, 1991, vol. 56, pp. 598–605.
 23. Pirson S.J. Computerised magnetolectric exploration-case history: Giddings field in Texas. *Oil and Gas Journal*, 1978, vol. 76, no. 25, pp. 168–178.
 24. Machel H.G. Magnetic contrasts as a result of hydrocarbon seepage and migration. Eds. D. Schumacher, M.A. Abrams. *Hydrocarbon migration and its near-surface expression: The American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1996, vol. 66, pp. 99–109.
 25. Kashtanov V.A. Lokalny nefteprognoz po dannym aeromagnetnoi semki [Local oilforecast by the data of aeromagnetic survey]. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, no. 12, pp. 7–12.
 26. Merkulov V.P. Magnitnye polya mestorozhdeniy nefti i gaza i vozmozhnosti ikh ispolzovaniya pri kartirovani zalezhey uglevodorodov [Magnetic fields of oil and gas deposits and the possibility of their use in mapping hydrocarbon deposits]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 218–224.
 27. Liu Q., Chan L., Liu Q., Li H., Wang F., Zhang S., Xia X., Cheng T. Relationship between magnetic anomalies and hydrocarbon microseepage above the Jingbian gas field, Ordos basin, China. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2004, vol. 88, no. 2, pp. 241–251.
 28. Donovan T.J., Forgy R.L., Roberts A.A. Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1979, vol. 63, pp. 245–248.
 29. Donovan T.J., Hendricks J.D., Roberts A.A., Eliason P.T. Low-Altitude aeromagnetic reconnaissance for petroleum in the Atctic National Wildlife Refuge, Alaska. *Geophysics*, 1994, vol. 49 (8), pp. 1338–1353.
 30. Wolleben J.A., Greenle D.W. Successful application of micromagnetic data to focus hydrocarbon exploration, in Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. Eds. D. Schumacher, L.A. LeSchac. *The American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology no. 48 and SEG Geophysical References Series*, 2002, no. 11, pp. 175–191.
 31. Aldana M., Costanzo-Alvarez V., D'az M. Magnetic and mineralogical studies to characterize oil reservoirs in Venezuela. *The Leading Edge*, 2003, vol. 22 (6), pp. 526–529.
 32. Liu Q., Liu Q., Chan L., Yang T., Xia X., Cheng T. Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field, Jiangnan Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, vol. 53, no. 1–2, pp. 25–33.
 33. Donovan T.J. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma – evidence and mechanisms. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1974, vol. 58, pp. 429–446.
 34. Al-Shaieb Z., Cairns J., Puckette J. Hydrocarbon-induced diagenetic aureoles: Indicators of deeper leaky reservoirs. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, 1994, vol. 10, pp. 24–48.
 35. Goldhaber M.B., Reynolds R.L., Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from south Texas coastal plain. *Geophysics*, 1991, vol. 56, pp. 748–757.
 36. Malysheko L.D., Korobov Yu.I. Metod DGM (diagnostiki genezisa mineralov) – effektivny fiziko-khimicheskii sposob lokalnogo prognoza zalezhey UV pri pryamykh poiskakh nefti i gaza [DGM method (diagnostic genesis of minerals) is the effective physicochemical method of local forecast of hydrocarbon deposits in direct search of oil and gas]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2006, no. 7, pp. 45–50.
 37. Khan S.D., Jacobson S. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, vol. 120, no. 1/2, pp. 96–105.
 38. Petrovic A., Khan S.D., Thurmond A.K. Integrated hyperspectral remote sensing, geochemical and isotopic studies for understanding hydrocarbon-induced rock alterations. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, vol. 35, pp. 292–308.
 39. Alekseev F.A. *Radiometricheskii metod poiskov nefti, sostoyanie metoda i opyt ego primeneniya. Razvedka i razrabotka poleznykh iskopaemykh* [Radiometric method of finding oil, the state of the method and experience in its application]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1958. pp. 51–56.
 40. Tedesco S.A. *Surface Geochemistry in Petroleum Exploration*. New York, Chapman & Hal, 1995. 256 p.

41. Duchscherer Jr W. *Geochemical Hydrocarbon Prospecting*. Tulsa, OK, Pennorthwestell Publ. Co., 1984. 278 p.
42. Rasheed M.A., Lakshmi M., Rao P.L.S., Kalpana M.S., Dayal A.M., Patil D.J. Geochemical evidences of trace metal anomalies for finding hydrocarbon microseepage in the petroliferous regions of the Tatipaka and Pasarlapudi areas of Krishna Godavari Basin, India. *Petroleum Science*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 19–29.
43. Radha B.A., Srinivasa P.L., Rasheed M.A., Patil D.J., Dayal A.M. Application of trace metal anomalies for recognition of petroleum prospects in surface sediments of Kutch and Saurashtra Basins, India. *Journal Geological Society of India*, 2012, vol. 80, pp. 802–812.
44. Srinivasa P.L., Srinu D., Rasheed M.A., Kalpana M.S., Patil D.J., Dayal A.M. Correlation of trace elements with hydrocarbon microseepage. *Journal Geological Society of India*, 2013, vol. 82, pp. 666–674.
45. Alekseev S.G., Veshev S.A., Voroshilov N.A., Margovich E.G., Shtokalenko M.B. Glubinnoe mineralogicheskoe izuchenie territoriy kompleksom sovremennykh metodov geokhimii i gefiziki [Deep mineragenous study within the complex of modern methods of geochemistry and geophysics]. *Prospect and protection of mineral resources*, 2011, no. 12, pp. 40–48.
46. Sobolev I.S. O vozmozhnosti izucheniya elementnogo sostava snegovogo pokrova pri geokhimicheskom kartirovaniy zon i oblastey vnedreniya glubinnyykh flyuidov (neftegazoposkovy aspect) [On the possibility of studying the elemental composition of snow cover for geochemical mapping zones and areas of implementation of deep fluids (oil and gas exploration aspect)]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, no. 1, pp. 68–77.
47. Zorkin L.M., Karus E.V., Kondratov L.S., Kuznetsov O.L., Petukhov A.V., Rogotskiy G.V., Chakhmaev V.G., Chirkin I.A., Tyminskiy V.G. Zakonomernosti formirovaniya i raspredeleniya geofizicheskikh i geokhimicheskikh poley [Regularities of formation and distribution of geophysical and geochemical fields]. *Soviet geology*, 1978, no. 1, pp. 94–104.
48. Ignatov A.P., Borovchuk I.F., Borodin V.A. Rtut – indikator uglevodorodov pri geokhimicheskikh poiskakh nefiti i gaza [Mercury is an indicator of hydrocarbon in geochemical prospecting of oil and gas]. *Doklady AN SSSR*, 1989, vol. 306, no. 2, pp. 443–447.
49. Sun Z., Xie X. Nationwide oil and gas geochemical exploration program in China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 139, pp. 201–206.
50. Alexan S., Fausnaugh J., Goudge C., Tedesco S. The use of iodine in geochemical exploration for hydrocarbons. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, 1986, vol. 2, pp. 49–72.
51. Tedesco S.A., Goudge C.K. Application of iodine surface geochemistry in the Denver-Julesburg Basin. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists Bulletin*, 1989, vol. 5, pp. 71–83.
52. Noskova E.S. Morfologiya intruziy trappov Baikitskoy anteklizy (Sibirskaya platforma) i ikh vozmozhnoe vliyaniye na neftegazoposkovost [Morphology of trap intrusions in Baikitskaya anticline (Siberian platform) and their possible impact on oil and gas potential]. *Materialy konferentsii. 2 Yanshinskije chteniya* [Proc. of the conference. 2nd Yashkinskie readings]. Moscow, 2002. pp. 107–110. Available at: <http://geo.web.ru/tectonics/yanshin/chart2/10/index.html> (accessed 14 January 2015).
53. Melnikov N.V., Efimov A.S., Smirnov E.V., Nazimkov G.D., Medyukhina L.V. Prisayano-Eniseyskaya sinekliza – obekt gazoposkovykh rabot na yugo-zapade Sibirskoy platformy [Prisayano-Eniseyskaya syncline is the object of gas exploration in the south-west of Siberian Platform]. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2010, no. 2, pp. 13–20.
54. Sobolev I.S., Rikhvanov L.P., Oleshko V.I., Lebedyanskiy I.N. Osobennosti provedeniya radoigekhimicheskoy semki pri poiskakh mestorozhdeniy nefiti i gaza v usloviyakh Sibirskoy platformy (na primere Imbinskoy ploshchadi) [Features of radiogeochemical survey in prospecting oil and gas in conditions of Siberian platform (by the example of Imbinskaya area)]. *Sostoyaniye i problemy geologicheskogo izucheniya nedr i razvitiya mineralno-syrovoy bazy Krasnoyarskogo kraya. Materialy doklada nauchnoy konferentsii* [Proc. of the conference State and problems of geological survey of assets and development of mineral base of Krasnoyarsk territory]. Krasnoyarsk, 2003. pp. 115–121.
55. Gavshin V.M. Radiokhimicheskaya spetsifika krupnykh osadochnyykh basseynov Zapadnoy i Sredney Sibiri [Radiogeochemical specifics of large sedimentary basins of Western and Middle Siberia]. *Geologiya i radiogekhimiya Sredney Sibiri* [Geology and radiogeochemistry of Middle Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. pp. 173–192.
56. Potseluev A.A., Bystrov I.I., Gavrilov R.Yu. *Pokazateli dispersii i variatsii geokhimicheskogo spektra kak kriterii neodnorodnosti geokhimicheskogo polya. Prikladnaya geokhimiya* [Measures of dispersion and geochemical spectrum variations as the criteria of heterogeneity of a geochemical field]. Moscow, IMGRE Press, 2002. Vol. 3, pp. 419–428.
57. Nikitin A.A. *Teoriticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii* [Theoretical foundations of processing geophysical information]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 342 p.
58. Salem A., Williams S., Samson E., Fairhead D., Ravat D., Blakeley R.J. Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic Tilt-Depth method. *Exploration Geophysics*, 2010, vol. 41, no. 3, pp. 198–209.
59. Saxov S., Nygaard K. Residuals Anomalies and Depth Estimation. *Geophysics*, 1953, vol. 18, no. 4, pp. 913–928.
60. Sazhina I.B. Interpretatsiya gravimetricheskoy semki v Krymskom i Abinskom rayonakh Krasnodarskogo kraya [Interpretation of gravimetric surveying in Crimean and Abinsk districts of Krasnodar region]. *Prikladnaya geofizika*, 1957, vol. 17, pp. 203–210.

Received: 06 February 2015.

УДК 553.411.071:550.4

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕТЮГЕНСКОГО ЗОЛОТО-СУРЬЯНОГО РУДНОГО ПОЛЯ (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Гаврилов Роман Юрьевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: GavrilovRY@ignd.tpu.ru

Ворошилов Валерий Гаврилович,

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

Сенкевич Владислав Сергеевич,

ведущ. геолог ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, д. 67. E-mail: sink777@mail.ru

Тямисов Николай Эрисенович,

гл. геолог ОАО Ордена Знак Почета «Янгеология», Россия, 678500, Республика Саха (Якутия), Верхоянский улус, пос. Батагай, ул. Октябрьская, д. 6. E-mail: yangeol@mail.ru

Широков Василий Владимирович,

ведущ. специалист ОАО Ордена Знак Почета «Янгеология», Россия, 678500, Россия, Республика Саха (Якутия), Верхоянский улус, пос. Батагай, ул. Октябрьская, д. 6. E-mail: yangeol@mail.ru

Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности ревизионных прогнозно-поисковых работ на рудное золото на основе применения современных методов обработки и интерпретации геохимической информации.

Цель работы: создание геолого-геохимической модели Бетюгенского золото-сурьмяного рудного поля, с выделением участков, перспективных для проведения дальнейших геологоразведочных работ.

Методы исследования: геохимическое картирование, математическая обработка результатов геохимических работ, моделирование геохимических полей методами многомерной статистики, геолого-генетическая интерпретация геохимических данных.

Результаты. На площади Бетюгенского рудного поля проведены геолого-геохимические работы, направленные на локализацию золото-сурьмяного типа оруденения. Фактическим материалом для картирования аномальной структуры геохимического поля и выявления зональности оруденения послужили результаты литогеохимического опробования по вторичным ореолам рассеяния. Установлено концентрически-зональное строение геохимических ореолов, контролирующих известные золото-сурьмяные рудопроявления. Зональность аномального геохимического поля проявлена в смене следующих геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): Ni, Co, Pb, Cu→Pb, B, Sn, Ni, Co→Mn, Pb, Sn, Co→Cu, Pb, Ni. Создана геолого-геохимическая модель рудного поля и выделены участки, перспективные на выявление золото-сурьмяного типа оруденения. Наличие геохимических ассоциаций гранитофильных элементов, образующих концентрически-зональные структуры вокруг ранее выявленных золото-сурьмяных рудопроявлений, свидетельствует в пользу парагенетической связи оруденения с невоскрытыми магматическими телами гранодиоритового состава К-Р (?) возраста, выходы которых закартированы в 6 км южнее опробованной площади. Анализ геохимической информации, основанный на статистических расчетах, построении карт химических элементов и комплексных показателей позволил создать геолого-геохимическую модель Бетюгенского рудного поля и выделить 5 участков для проведения поисковых работ: два участка первой очереди и три участка второй очереди.

Ключевые слова:

Бетюгенское рудное поле, золото-сурьмяное оруденение, аномальная структура геохимического поля, геохимическая зональность, вторичные ореолы рассеяния.

Постановка задачи

Возобновление работ на потенциально золото-рудных площадях обусловлено целым рядом факторов: сокращением запасов на эксплуатируемых

месторождениях, отсутствием подготовленных объектов для воспроизводства минерально-сырьевой базы действующих горнодобывающих предприятий, неоднозначностью выводов о потен-

циально перспективных объектах, полученных в процессе ранее проведенных поисковых работ, появлением новых подходов к обработке геохимической информации [1–12].

Целью данной работы является расшифровка геохимической зональности, моделирование аномальной структуры геохимического поля (АСГП) золото-сурьмяного оруденения на площади Бетюгенского рудного поля и выделение перспективных участков для постановки дальнейших геологоразведочных работ.

Методика исследования

На площади Бетюгенского рудного поля выполнена литохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния. Опробование проведено по сети 200×20 м, для участка детализации – 100×20 м. Из коры выветривания, развитой по осадочным породам деленжинской свиты (P_2dl), и перекрывающих четвертичных отложений отобрано более 3000 проб. Содержания золота определены химико-спектральным методом, элементов-спутников оруденения – эмиссионным спектральным полуколичественным анализом. Все анализы проведены в аттестованной и аккредитованной лаборатории «Центральная геологическая лаборатория», структурном подразделении Государственного унитарного горно-геологического предприятия Республики Саха (Якутия) «Якутскгеология». Рассчитаны фоновые и минимально-аномальные содержания элементов, построены карты распределения аномальных концентраций химических элементов и комплексных показателей (КП).

При составлении геолого-геохимической модели использовались моноэлементные карты, расчеты показателя интенсивности геохимических преобразований, методы непараметрической (ранговая корреляция) и многомерной (кластерный и факторный анализы) статистики.

Краткие сведения о геологическом строении рудного поля

Геологическое строение площади приводится по В.В. Масленникову, выполнявшему в 1978 г. на описываемой территории геологосъемочные работы.

Бетюгенское рудное поле (рис. 1) расположено на правом склоне р. Бетюген – правом притоке р. Кыры (левобережье р. Дулгалах), и приурочено к своду крупной Дулгалахской антиклинали в месте воздымания её шарнира и изгиба оси (сопровождающегося виргацией) на участке Бытантайского поперечного поднятия (Западное Верхоянье). В металлогеническом отношении рудное поле является частью Кимпиче-Берелехского серебрянорудного узла [13].

В пределах рудного поля вскрывается монотонная толща (>400 м) черных углистых алевролитов нижней подсвиты дулгалахской свиты верхней перми, смятая в симметричную антиклинальную складку северо-восточного (50°) простирания. Падение крыльев крутое ($65...75^\circ$), юго-восточное

крыло осложнено двумя дополнительными складками с размахом крыльев до первых сотен метров.

Выделятся две серии разломов: продольные северо-восточного простирания (крутопадающие сбросы, пологопадающие внутри- и межпластовые срывы) и поперечные северо-западного простирания (крутопадающие сбросо-сдвиги). С последними в 6 км южнее рудопоявления связаны две дайки меловых (?) кварцевых диорит-порфиритов (мощность 3...4 м, длина до 200...1000 м, простирание 310° , падение крутое). Порфириты слабо магнитны и содержат обильную тонкорассеянную вкрапленность пирита.

Вблизи рудопоявления зафиксирована наиболее интенсивная в этом районе магнитная аномалия, совпадающая с минимумом гравитационного поля и, возможно, связанная с нескрытым малым интрузивом гранодиоритового состава.

Наиболее распространены пологопадающие межпластовые срывы, в зонах которых часто локализируются рудные тела и кварцевые жилы. Часть крутопадающих продольных разрывов также несет оруденение. Одно из выявленных рудных тел локализовано в поперечном разрыве. Многочисленны трещины кливажа осевой поверхности, обеспечившего тонколистоватую отдельность алевролитов, часто маскирующую слоистость.

В пределах рудного поля выявлено 10 сурьмянорудных тел. Морфология отдельных минерализованных антимонитом тел сравнительно простая: компактные, с четкими ровными контактами, при мощности тел от 0,5 до 1,6 м, единично до 6,5 м и протяженностью до 200 м. Однако в совокупности они образуют сложную комбинацию межпластовых залежей и секущих крутопадающих жил, довольно изменчивых по простиранию и, вероятно, падению. Тела вскрыты канавами, преимущественно в единичных пересечениях, и прослежены по элювиальным развалам обломков антимонита.

Основные результаты исследования и их обсуждение

В результате корреляционного анализа установлено, что Au проявляет устойчивую положительную корреляционную связь с Sb и As, а мышьяк проявляет значимую положительную связь с бором. Таким образом, следует обратить особое внимание на распределение содержания бора и ассоциаций элементов, в которые этот элемент входит.

Бор пространственно ассоциирует с комплексом аномалий Ni, Mn, Co, Sn, Cu, Pb. Для получения дополнительной информации о строении аномального геохимического поля были вычислены многомерные показатели, включающие эти элементы, и проанализирована взаимосвязь их пространственного распределения с золото-сурьмяной минерализацией. Статистические расчеты КП проведены с использованием показателя энергии рудообразования, факторного и кластерного анализов.

Показатель энергии рудообразования, характеризующий интенсивность процессов массопереноса вещества, предложен Н.И. Сафроновым для ха-

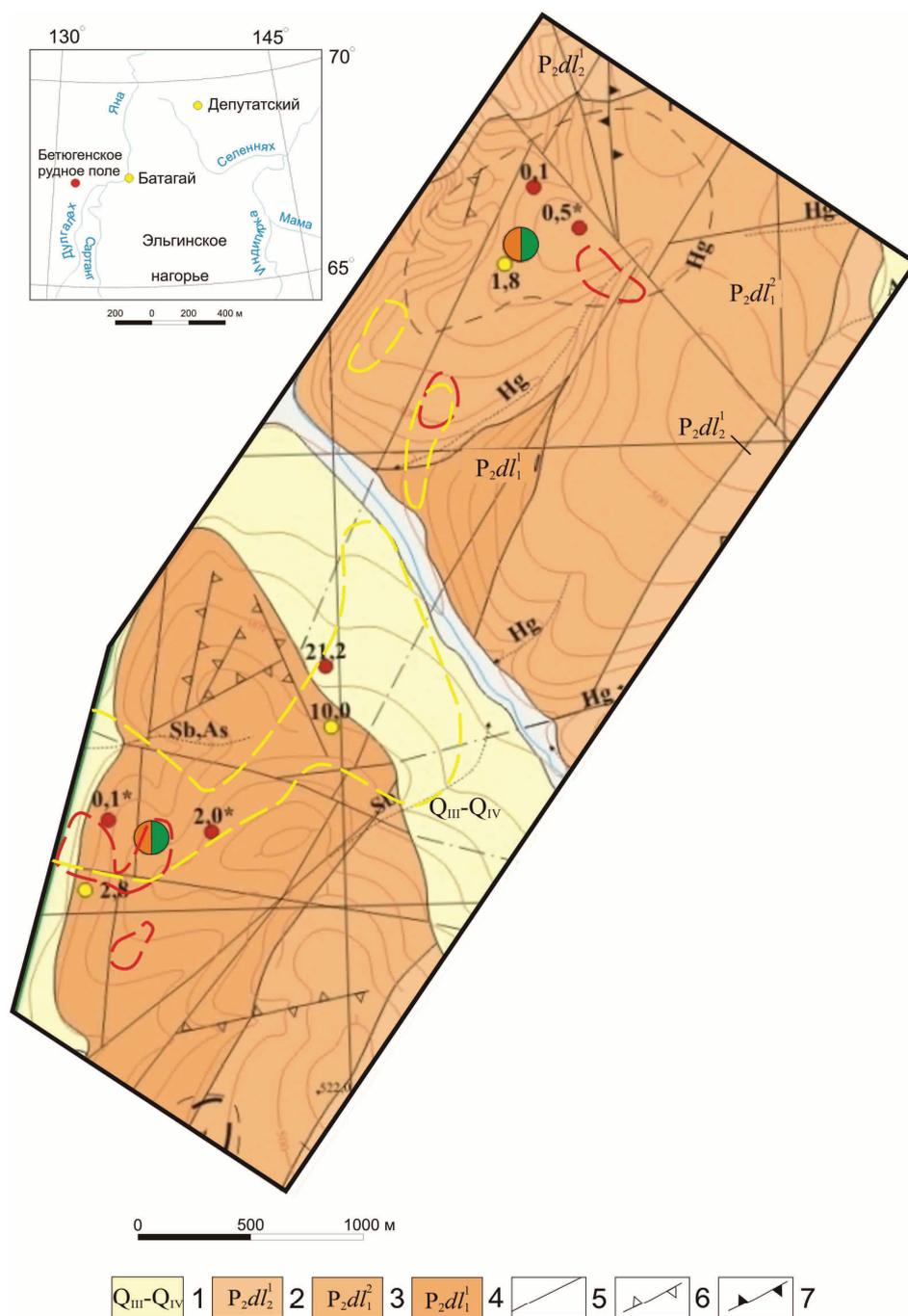


Рис. 1. Геологическая карта Бетюгенского рудного поля: 1 – верхнечетвертичные и современные отложения; 2–4 – дулгалахская свита: 2 – верхняя подсвита: песчаники, алевролиты; 3 – нижняя подсвита, верхняя толща: алевролиты, аргиллиты; 4 – нижняя подсвита, нижняя толща: алевролиты, песчаники; 5 – вертикальные сбросо-сдвиги; 6, 7 – гидротермальные образования: 6 – секущие кварцевые и кварц-карбонатные зоны минерализации; 7 – секущие зоны кварц-халцедон-каолинитовых брекчий; 8 – литохимические потоки рассеяния $>10 C_{\Phi}$; 9–11 – первичные литохимические ореолы: 9 – $Hg > 100 C_{\Phi}$; 10 – $Au > 0,005$ г/т; 11 – $Sb > 50$ г/т; 12, 13 – точки с повышенным содержанием золота и серебра: 12 – по результатам пробирного анализа, г/т; 13 – по результатам спектрозолотометрического анализа, г/т; 14 – золото-сурьмяное рудопроявление

Fig. 1. Geological map of Betyugenskoje ore field: 1 – upper quarternary and current deposits; 2–4 – dulgalakhskaya formation: 2 – upper subformation: sandstones, silt stones; 3 – lower subformation, upper formation: silt stones, agrillites; 4 – lower subformation, lower formation: silt stones, sandstones; 5 – vertical diagonal-slip faults; 6, 7 – hydrothermal growth: 6 – cross quartz and quartz-carbonaceous mineralization zones; 7 – cross zones of quartz-chalcedony-kaolinite breccias; 8 – lithochemical dispersion trains $>10 C_{\Phi}$; 9–11 – primary lithochemical haloes: 9 – $Hg > 100 C_{\Phi}$; 10 – $Au > 0,005$ g/t; 11 – $Sb > 50$ g/t; 12, 13 – points with high concentration of gold and silver: 12 – by the results of assay test, g/t; 13 – by the results of spectrographic aurometric analysis, g/t; 14 – gold-antimony mineral occurrence

рактические руд сложного состава и комплексных ореолов [14]:

$$E_n = \sum_{i=1}^n K_i \cdot \ln K_i,$$

где K_i – коэффициент концентрации элемента относительно кларка.

Значения показателя на поисковом участке варьируют в широких пределах, изменяясь от –1,9 до 68 (в безразмерных единицах). Высококонтрастные положительные ореолы (>10), занимающие ограниченные площади, распространены в южной и северной частях площади по периферии известных рудопроявлений (рис. 2). Сами золото-сурьмяные проявления расположены в пределах ореолов со значениями 3...5, что свидетельствует о парагенетической связи комплекса рассматриваемых элементов с золото-сурьмяным оруденением. Кроме того, крупные и достаточно интенсивные (>5) ореолы показателя картируются в центральной части участка, что, вероятнее всего, связано с массовым сносом обломочного материала различного состава в долину водотока.

Таким образом, показатель «энергии рудообразования» отражает в данном случае не только интенсивность рудообразующего процесса, но и гипергенные преобразования в меняющихся ландшафтных условиях. Соответственно, этот показатель (как и другие показатели «интенсивности»), применительно к аккумуляциям во вторичном геохимическом поле, нельзя напрямую использовать для оконтуривания перспективных участков.

Для выявления ассоциаций рудогенных элементов с синхронным поведением в геохимических процессах был проведен факторный анализ. Выделено три ассоциации, вклад которых в общую дисперсию составляет 60 %: В, Pb, Sn – фактор 1; Mn, Co, Sn – фактор 2; Ni, Cu, Co – фактор 3.

Все факторы являются «рудными», то есть элементы, характеризующиеся максимальными нагрузками на эти факторы, участвовали в рудном процессе.

Первый фактор, с вкладом в общую дисперсию 21 %, в большинстве случаев пространственно ассоциирует с ранее выявленными рудопроявлениями и геохимическими аномалиями золота (рис. 3).

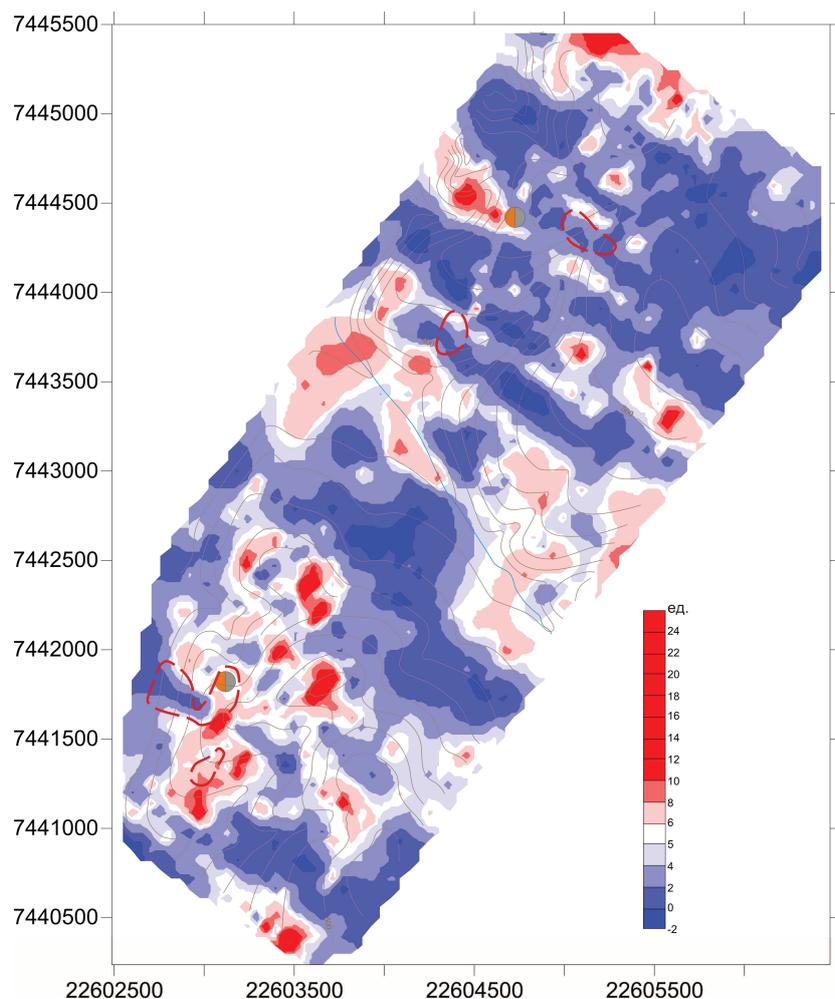


Рис. 2. Схема распределения значений показателя энергии рудообразования. Здесь и на рис. 3, 5 красной пунктирной линией обозначены ореолы Au >0,005 г/т

Fig. 2. Pattern of distribution of mineralization energy index values. Here and in Fig. 3, 5 the haloes Au >0,005 g/t are dotted

Аномальные значения фактора окаймляют известные рудопоявления. Ореолы представлены линейными, изометричными и дугowymi формами. Еще несколько структур подобного типа располагаются в центральной и южной части площади. Они приурочены к долине безымянного водотока и пространственно ассоциируют с первичными ореолами мышьяка и сурьмы. Первый фактор, судя по составу, отражает интенсивность воздействия на вмещающие породы не вскрытой гранитоидной интрузии, маркируя, видимо, ее куполовидные выступы.

Таким же вкладом в общую дисперсию характеризуется фактор 2. Ореолы повышенных значений фактора имеют преимущественно дуговые и

линейно вытянутые очертания. Высокие значения фактора окаймляют золото-сурьмяную минерализацию дугowymi структурами. На южной границе площади высокие значения фактора пространственно частично совмещены с первичными ореолами мышьяка и сурьмы. Генетическая интерпретация 2-го фактора – это процесс выноса элементов за пределы рудных зон и их переотложение на периферии этих зон.

Фактор 3 определяет около 18 % общей дисперсии. Наибольший вклад в значение фактора вносит Ni. Аномальные значения фактора совпадают с проявлениями золото-сурьмяной минерализации, а также образуют отдельные ореолы на всей поисковой площади. Судя по составу и пространствен-

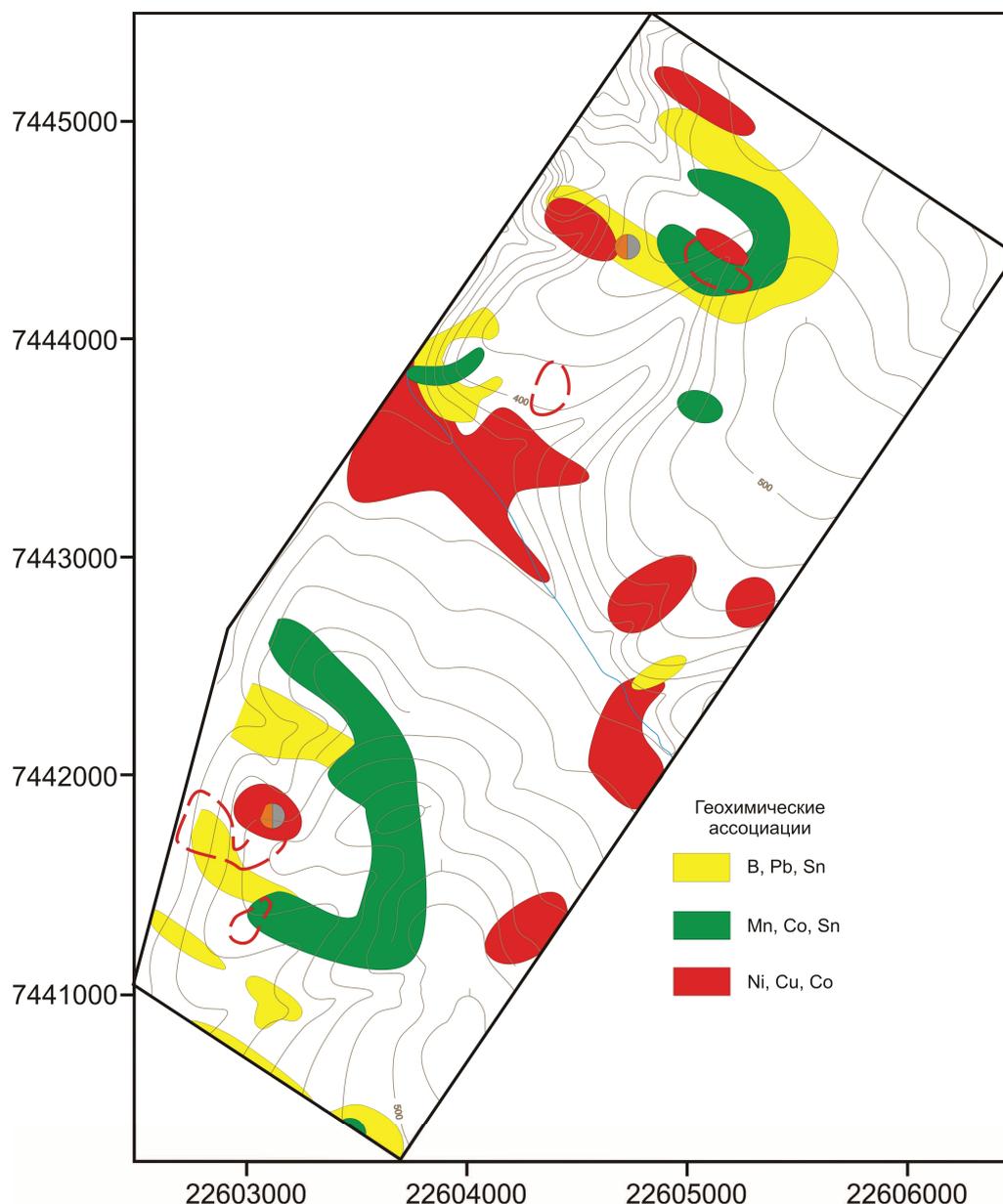


Рис. 3. Схема распределения геохимических ассоциаций по результатам факторного анализа

Fig. 3. Pattern of geochemical association distribution by the results of factor analysis

ному положению аномалий, фактор 3 отражает суммарное воздействие гипогенных и гипергенных процессов на наиболее подвижные элементы.

Геохимические ассоциации элементов, выделенные по результатам факторного анализа, образуют концентрически-зональные структуры, приуроченные к ранее выявленным золото-сурьмяным рудопроявлениям. Однако наблюдается некоторое отличие в строении ореолов и их расположении относительно золото-сурьмяных рудопроявлений. От центральной части к периферии элементный состав ореолов изменяется следующим образом: в южной части – Ni, Cu, Co → B, Pb, Sn → Mn, Co, Sn, в северной части – Ni, Cu, Co → Mn, Co, Sn → B, Pb, Sn. Если южное рудопроявление приурочено к центральной части концентрически-зональной структуры, то северное – к ее периферии. Данные отличия могут быть связаны как с различным уровнем эрозионного среза рудопроявлений, так и со значительной мощностью отложений, перекрывающих северную часть площади.

С использованием *кластер-анализа* построена иерархическая структура корреляционных взаимосвязей химических элементов (рис. 4). Элементы объединились в следующие кластеры: 1) Mn, Co; 2) Pb, Sn, B; 3) Cu, Ni.

Методом К-средних проведено разделение 3125 наблюдений (проб) на 6 кластеров. При статистических расчетах использовались нормированные содержания химических элементов. В результате в пределах участка работ геометризованы квазигомогенные области геохимического поля, характеризующиеся специфическими геохимическими спектрами (рис. 5).

Наибольший вклад в кластер 4 вносят содержания Ni (2,6), Co (1,2), Pb (1,1) и Cu (0,9) (цифры в скобках – сверхфоновые средние содержания элементов в пределах кластера, нормированные по стандартным отклонениям). Ореолы кластера достаточно уверенно картируют золото-сурьмяные рудопроявления, а также образуют существенные площадные аномалии в долине безымянного ручья, обусловленные, видимо, сносом со склонов обломочного материала.

Pb (2,7), B (1,4), Sn (1,2), Ni (1,2), Co (1) – геохимический спектр 6-го кластера. В южной и северной части площади ореолы кластера образуют незамкнутые кольцевые структуры по периферии золото-сурьмяных рудопроявлений.

Области геохимического поля, характеризующиеся наибольшими концентрациями Mn (3,3) и повышенным содержанием Pb (1,3), Sn (1,2), Co (0,9), относятся к 1 кластеру. Они образуют ореолы дугообразной формы вокруг золото-сурьмяных рудопроявлений.

3-й кластер (Cu (1,2), Pb (1,1), Ni (1,1)) объединяет пробы, образующие незамкнутые кольцевые структуры также по периферии золото-сурьмяных рудопроявлений.

Пробы, относящиеся к кластеру 2, характеризующемуся спектром Ni (1,2), Pb (0,9) и Co (0,9), в пределах исследуемой площади распространены относительно равномерно, фиксируя, видимо, периферийные зоны гидротермально-метасоматических преобразований, образующие замкнутые фигуры только в пределах более обширных площадей (рудных полей и /или узлов).

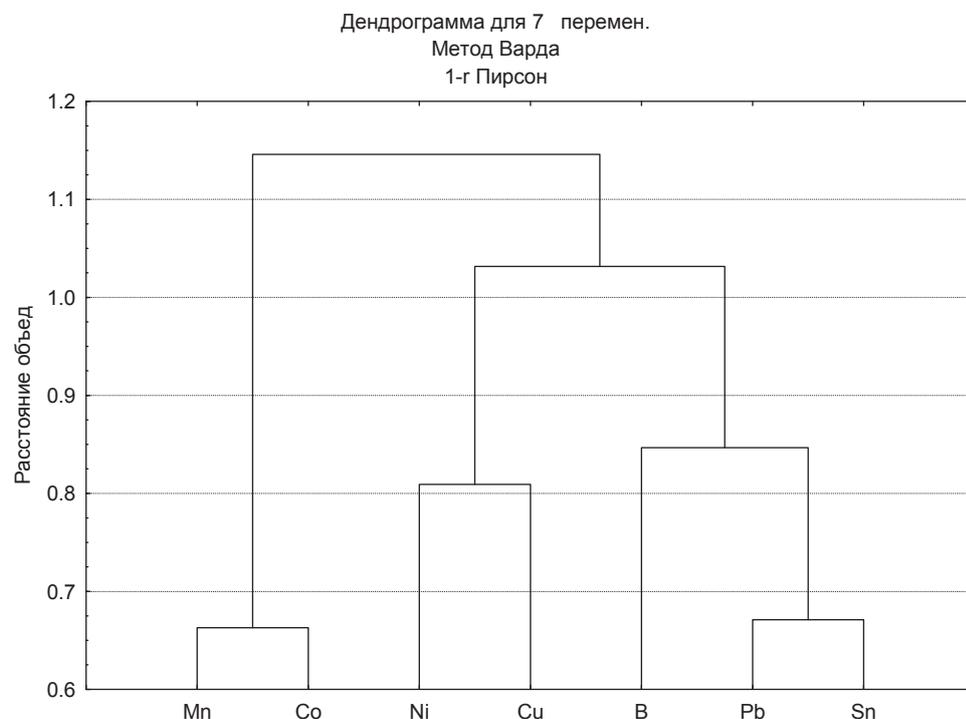


Рис. 4. Результаты кластер-анализа по вторичным ореолам рассеяния

Fig. 4. Results of cluster analysis by the secondary haloes of distribution

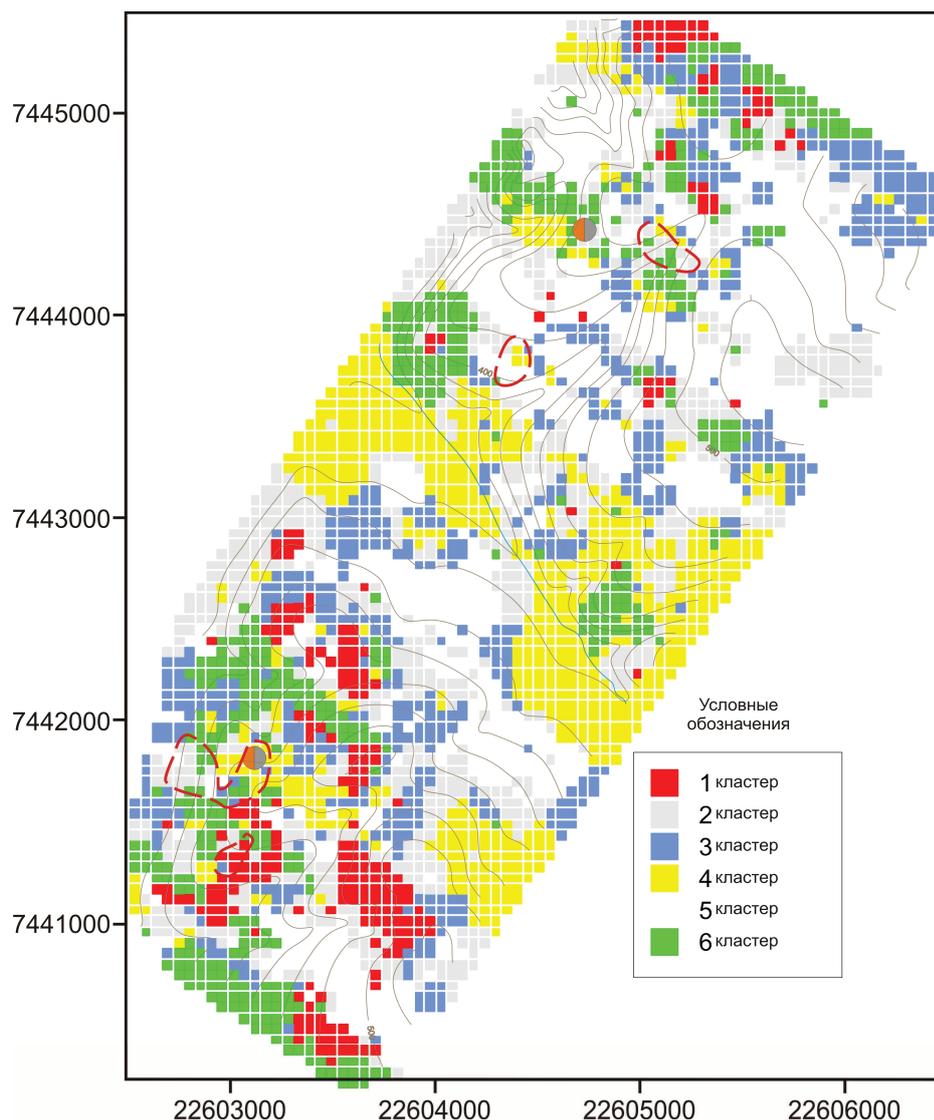


Рис. 5. Схема распределения кластеров

Fig. 5. Diagram of clusters distribution

Пробы кластера 5 на поисковой площади распределены относительно равномерно, характеризуются фоновыми содержаниями всех элементов и маркируют участки, наименее затронутые процессами гидротермально-метасоматического преобразования («породный» кластер).

По совокупности полученных данных создана многомерная модель структуры аномального геохимического поля поискового участка (рис. 6).

В результате проведенного анализа установлено, что выделенные ассоциации элементов образуют концентрически-зональные структуры, приуроченные к золото-сурьмяным рудопроявлениям в северной и южной частях площади.

Помимо аномальных геохимических полей, связанных с известными ранее рудопроявлениями, на южном фланге опосредованной площади отмечается не оконтуренная с юга концентрически-зональная геохимическая структура, простран-

ственно ассоциирующая с вторичными ореолами мышьяка и сурьмы. По правому борту безымянного ручья, в центре участка, также проявлены две слабо структурированные аномалии геохимического поля, характеризующиеся повышенными концентрациями гранитофильных элементов, ассоциирующих с потоками рассеяния ртути.

Выявленная зональность в целом не противоречит результатам, установленным в работах [15–21].

Заключение

Расшифровка строения аномального геохимического поля позволила установить концентрически-зональное строение вторичных ореолов рассеяния элементов-спутников, приуроченных к золото-сурьмяным рудопроявлениям, расположенным в северной и южной части площади. Зональность аномального геохимического поля проявлена в

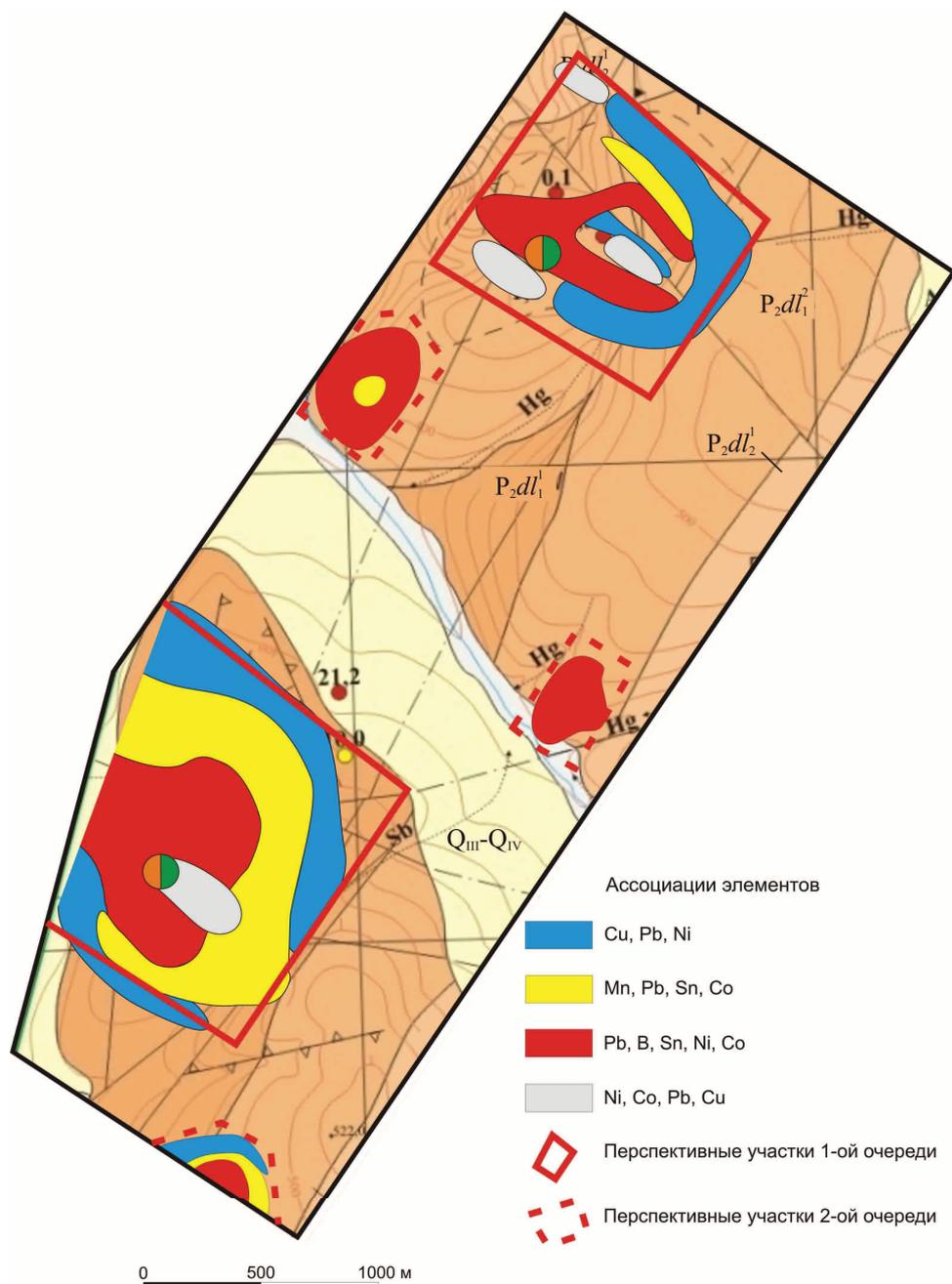


Рис. 6. Модель структуры аномального геохимического поля с выделенными перспективными участками. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 6. Model of abnormal geochemical field structure with perspective areas. The symbols are the same as in Fig. 1.

смене следующих геохимических ассоциаций (от тыловой зоны к фронтальной): Ni, Co, Pb, Cu → Pb, B, Sn, Ni, Co → Mn, Pb, Sn, Co → Cu, Pb, Ni.

В отличие от южной части, аномальное геохимическое поле на севере площади имеет менее четкую выраженную структуру, что связано, по нашему мнению, с различным уровнем эрозионного среза оруденения и наличием более мощной толщи перекрывающих отложений на северном фланге. Полученные данные, наряду с геологической информацией, могут свидетельствовать о среднерудном

уровне эрозионного среза южного рудопроявления и верхнерудном – северного.

Наличие геохимических ассоциаций гранитофильных элементов, образующих концентрически-зональные структуры вокруг ранее выявленных золото-сурьмяных рудопроявлений, свидетельствует в пользу парагенетической связи оруденения с нескрытыми магматическими телами гранодиоритового состава К-Р (?) возраста, выходы которых закартированы в 6 км южнее опознанной площади.

Анализ геохимической информации, основанный на статистических расчетах, построении карт химических элементов и комплексных показателей позволил создать геолого-геохимическую модель Бетюгенского рудного поля и выделить 5 участков для проведения поисковых работ: два участка первой очереди и три участка второй очереди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоров С.А. Основы структурной интерпретации геохимических полей рудных объектов для целей их локализации и оценки // Отечественная геология. – 2007. – № 4. – С. 45–52.
2. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабы оруденения // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – С. 3–19.
3. Гаврилов Р.Ю., Хряпин Д.А. Структура геохимического поля мезотермального золоторудного месторождения Западное (Ленский рудный район) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 137–146.
4. Yilmaz H. Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure // J. Geochem. Explor. – 2003. – V. 80. – № 1. – P. 117–135.
5. Goodman S., Williams-Jones A.E., Carles P. Structural controls on the Archean troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada // Econ. Geol. – 2005. – V. 100. – № 3. – P. 577–582.
6. Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions // Society of Economic Geologists. – 2000. – Reviews 13. – P. 377–400.
7. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization / R. Mustard, Th. Ulrich, V.S. Kamenetsky, T. Mernagh // Geology. – 2006. – V. 34. – № 2. – P. 85–88.
8. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales // Mineral Deposita. – 2001. – V. 36. – № 4. – P. 542–562.
9. Yang H.M., Lentz D.R. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusion southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution and fluorine-chlorine activity // Contribution Mineral Petroleum. – 2005. – V. 150. – P. 287–305.
10. Геолого-геохимические особенности гигантских месторождений золота в черных сланцах Центральной Азии / М.С. Рафаилович, И.М. Голованов, О.А. Федоренко и др. // Поисковая геохимия: теоретические основы, технологии, результаты. – Алматы: НИИ природных ресурсов ЮГГЕО, 2004. – С. 67–83.
11. Чекваидзе В.Б., Миляев С.А. Эндеогенные ореолы сидерофильных элементов золоторудных месторождений // Руды и металлы. – 2009. – № 6. – С. 15–20.
12. Выборов С.Г., Быстров И.И. Опыт использования комплексного показателя нарушенности геохимического поля для прогнозирования оруденения // Известия вузов. Геология и разведка. – 1990. – № 4. – С. 102–110.
13. Тихонова Н.В. Геологическое строение серебряного месторождения Кимпиче: Западное Верхоянье: дис.... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2009. – 143 с.
14. Сафронов Н.И., Мещеряков С.С., Иванов Н.П. Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых / под общ. ред. Н.И. Марочкина. – Л.: Недра, 1978. – 215 с.
15. Gavrilo R.Y., Khmelev M.S., Abramova R.N. Volumetric geochemical model of Chortovo Koryto gold-ore deposit (Patom range) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – V. 21. – Iss. 1. – P. 1–6.
16. Structure-geochemical zoning of Topolninsk gold-ore field (Gorny Altai) / T.V. Timkin, D.S. Lavrov, O.Y. Askanakova, T.V. Korotchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – V. 21. – P. 1–6.
17. Gold in Pyrite within Altai – Sayan Folded Belt Gold Deposits / A.Y. Pshenichkin, Y.A. Oskina, O.V. Savinova, T.F. Dolgaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – V. 21. – P. 1–4.
18. Anomaly Geochemical Fields in Siberian Hydrothermal Gold Deposits / V.G. Voroshilov, O.V. Savinova, Y.S. Ananjev, R.N. Abramova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – V. 21. – P. 1–6.
19. Григоров С.А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 44–48.
20. Григоров С.А. Отражение в геохимическом поле рудообразующей системы, как объекта геохимических поисков // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 5. – С. 8–13.
21. Григоров С.А. Золотоносные метасоматиты Центральной Колымы, их потенциал и перспективы освоения // Руды и металлы. – 2014. – № 5. – С. 45–49.

Поступила 22.01.2015 г.

UDC 553.411.071:550.4

GEOLOGY-GEOCHEMISTRY MODEL OF BETYUGENSK GOLD-ANTIMONY ORE FIELD (REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA))

Roman Yu. Gavrillov,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: GavrillovRY@ignd.tpu.ru

Valeriy G. Voroshilov,

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

Vladislav S. Senkevich,

Siberian Research-and-development Institute of geology, geophysics,
67, Krasny Avenue, Novosibirsk, 630091 Russia,. E-mail: sink777@mail.ru

Nikolay E. Tyamisov,

Yangeologiya, Russia, 678500, 6, Oktyabrskaya street, Batogay,
Verchoyanskiy ulus, Republic of Sacha (Yakutia). E-mail: yangeol@mail.ru

Shirokov V. Vasily,

Yangeologiya, Russia, 678500, 6, Oktyabrskaya street, Batogay,
Verchoyanskiy ulus, Republic of Sacha (Yakutia). E-mail: yangeol@mail.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to improve the efficiency of revising forecast and search gold-bearing operations based on using modern methods of geochemical information processing and interpretation.

The main aim of the research is to study geochemical zones and to detect abnormality of geochemical structure of Betyugenskoe gold-antimonite ore zone designating perspective areas.

Research methods: calculation of statistical parameters by nonparametric statistics methods and their processing in programs: Surfer, Statistica, Corel Draw, emission spectral half-amount analyzing, analyzing in test-tube.

Results. At Betyugenskoe gold ore-zones the geological-geochemical operations were performed with a view to localize gold-antimonite mineralization. The results of litho-geochemical testing by secondary dispersion haloes served as the material for charting abnormality zone of geochemical area and detection ore zones. The concentrically zoned structure of geochemical halos controlling gold-antimonite ores was determined. Zonality of abnormal geochemical field occurs in change of the following geochemical associations (from the backcourt zone to the front one): Ni, Co, Pb, Cu→Pb, B, Sn, Ni, Co→Mn, Pb, Sn, Co→Cu, Pb, Ni. The authors developed the geological-geochemical model of ore field and allocated perspective areas. Presence of geochemical associations of granite elements forming concentrically-zone structures around earlier revealed gold-antimony mineralization identifies the paragenetic bound of mineralization with untapped rock bodies of granite-diorite structure of K-P (?) age. Their outputs are mapped 6 km to the south of the search area. The analysis of geochemical information based on statistical calculations, mapping chemical elements and integrated indicators allow developing geological and geochemical model of Betyugenskoe ore field and allocating five areas for survey and assessment work: two sections of the first stage and three sections of the second stage.

Key words:

Betyugenskoy ore field, gold-antimony ore, anomalous structure of geochemical field, geochemical zonality, secondary dispersion halos.

REFERENCES

1. Grigorov S.A. Osnovy strukturnoy interpretatsii geokhimicheskikh poley rudnykh obektov dlya tseley ikh lokalizatsii i otsenki [Fundamentals of structural interpretation of ore object geochemical fields for their localization and evaluation]. *Otechestvennaya geologiya*, 2007, vol. 4, pp. 45–52.
2. Voroshilov V.G. Anomalnye struktury geokhimicheskikh poley gidrotermalnykh mestorozhdeniy zolota: mekhanizm formirovaniya, metodika geometrizatsii, tipovye modeli, prognoz masshtabnosti orudneniya [Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of ore deposit*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19.
3. Gavrillov R.Yu. Obemnaya geologo-geokhimicheskaya model mezotermalnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Chertovo Koryto (Patomskoe nagore) [Geochemical field structure of mesothermal zapadnoe gold ore deposit (Lensk ore area)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 137–146.
4. Yilmaz H. Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure. *J. Geochem. Explor.*, 2003, vol. 80, no. 1, pp. 117–135.
5. Goodman S., Williams-Jones A.E., Carles P. Structural controls on the Archean troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada. *Econ. Geol.*, 2005, vol. 100, no. 3, pp. 577–582.
6. Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions. *Society of Economic Geologists*, 2000, Reviews 13, pp. 377–400.
7. Mustard R., Ulrich Th., Kamenetsky V.S., Mernagh T. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization. *Geology*, 2006, vol. 34, no. 2, pp. 85–88.
8. Mustard R. Granite-hosted gold mineralization at Timbarra, northern New South Wales. *Mineral Deposita*, 2001, vol. 36, no. 4, pp. 542–562.

9. Yang H.M., Lentz D.R. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusion southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution and fluorine-chlorine activity. *Contribution Mineral Petroleum*, 2005, vol. 150, pp. 287–305.
10. Rafailovich M.S., Golovanov I.M., Fedorenko O.A. Geologo-geokhimicheskie osobennosti gigantских mestorozhdeniy zolota v chernykh slantsakh Tsentralnoy Azii [Geological and geochemical features of giant gold deposits in black slate]. *Poiskovaya geokhimiya: teoreticheskie osnovy, tekhnologii, rezultaty* [Search geochemistry: theory, technologies, results]. Almaty, NII prirodnykh resursov JuGGEO Press, 2004. pp. 67–83.
11. Chekvaidze V.B., Milyaev S.A. Endogennye oreoly siderofilnykh elementov zolotorudnykh mestorozhdeniy [Endogenous aura of siderophilic elements of gold deposits]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2009, no. 6, pp. 15–20.
12. Vyborov S.G., Bystrov I.I. Opyt ispolzovaniya kompleksnogo pokazatelya narushennosti geokhimicheskogo polya dlya prognozirovaniya orudneniya [Experience in using composite indicator of geochemical field fracturing to predict mineralization]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1990, no. 4, pp. 102–110.
13. Tikhonova N.V. *Geologicheskoe stroenie serebryanogo mestorozhdeniya Kimpiche: Zapadnoye Verkhoyane. Dis. Kand. nauk* [Geological structure of a silver field Kimpich: Western Verkhoyane. Cand. Diss.]. Moscow. 2009. 143 p.
14. Safronov N.I., Meshcheryakov S.S., Ivanov N.P. *Energiya rudobrazovaniya i poiski poleznykh iskopaemykh* [Ore formation energy and mineral exploration]. Ed. N.I. Marochkin. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 215 p.
15. Gavrillov R.Y., Khmelev M.S., Abramova R.N. Volumetric geochemical model of Chortovo Koryto gold-ore deposit (Patom range). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, Iss. 1, pp. 1–6.
16. Timkin T.V., Lavrov D.S., Askanakova O.Y., Korotchenko T.V. Structure-geochemical zoning of Topolninsk gold-ore field (Gorny Altai). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6.
17. Pshenichkin A.Y., Oskina Y.A., Savinova O.V., Dolgaya T.F. Gold in Pyrite within Altai – Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–4.
18. Voroshilov V.G., Savinova O.V., Ananjev Y.S., Abramova R.N. Anomaly Geochemical Fields in Siberian Hydrothermal Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6.
19. Grigorov S.A. Genesis i dinamika formirovaniya Natalkinskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya po dannym sistemnogo analiza geokhimicheskogo polya [Genesis and dynamics of formation of the Natalkinsky gold field according to the system analysis of a geochemical field]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2006, no. 3, pp. 44–48.
20. Grigorov S.A. Otrazhenie v geokhimicheskom pole rudoobrazuyushchey sistemy, kak obekta geokhimicheskikh poiskov [Reflection in a geochemical field of ore-forming system, as an object of geochemical searches]. *Razvedka i okhrana neдр – Investigation and protection of a subsoil*, 2009, no. 5, pp. 8–13.
21. Grigorov S.A. Zolotonosnye metasomatity Centralnoy Kolymy, ikh potentsial i perspektivy osvoeniya [Gold-bearing metasomatites of the Central Kolyma, their potential and prospects of development]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2014, no. 5, pp. 45–49.

Received: 22 January 2015.

УДК 622.243

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ АЛМАЗНОЙ КОРОНКИ ДЛЯ БУРЕНИЯ В ТВЕРДЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Нескоромных Вячеслав Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: sovair@bk.ru

Петенёв Павел Геннадьевич,

аспирант кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: pavel-whait@mail.ru

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Пушмин Павел Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры технологий геологической разведки Института недропользования Иркутского Государственного технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: pps@istu.edu

Романов Григорий Родионович,

аспирант кафедры технологий геологической разведки Института недропользования Иркутского Государственного технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: grom123456@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблемы повышения эффективности бурения скважин в твердых анизотропных горных породах.

Цель работы: Исследование и разработка новой модели алмазной буровой коронки для эффективного бурения твердых анизотропных горных пород.

Методы исследования: Аналитические исследования и экспериментальные работы по оценке работоспособности новой алмазной коронки на буровом стенде.

Результаты: Разработана модель новой алмазной коронки, позволяющей реализовать высокопроизводительное бурение анизотропных горных пород. Представлены данные аналитического анализа и методика экспериментальных работ на буровом стенде. Проведено опытное бурение новой коронкой, которое показало особенности механики работы опытной коронки, что позволяет провести усовершенствование конструкции бурового инструмента. Установлены закономерности влияния параметров режима бурения на характер и интенсивность изнашивания коронки, механическую скорость бурения, энергоемкость процесса бурения.

Выводы. Опытная коронка, разработанная для условий бурения скважин в твердых анизотропных горных породах, в условиях экспериментального бурения показала свою высокую работоспособность. Полученные результаты экспериментальных работ подтвердили анализ и позволили уточнить механизм работы опытной коронки при различных параметрах режима бурения с применением различных очистных агентов – воды и эмульсии. Новые данные о механизме работы коронки будут использоваться для усовершенствования конструкции опытного образца коронки, что позволит получить более совершенный буровой инструмент для колонкового бурения твердых анизотропных горных пород.

Ключевые слова:

Горная порода, бурение, эксперимент, алмазная коронка, разрушение.

Для бурения скважин в твердых породах применяются различные типы алмазных коронок с кольцевой алмазосодержащей матрицей, разделенной на сектора промывочными пазами равных размеров. Указанная конструкция коронки выполняется с матрицей, которая имеет

определенную в зависимости от твердости и абразивности горных пород твердость алмазосодержащих секторов и насыщенность алмазами. Твердость секторов матрицы и насыщенность алмазами секторов матрицы выполняются одинаковыми.

Недостатком коронок с равным размером секторов является низкая эффективность как средства, снижающего искривление скважин при бурении анизотропных горных пород. Учитывая, что основная часть твердых горных пород является анизотропной, проблема сохранения проектного направления скважин, особенно глубоких, является актуальной. Причины искривления скважин при бурении анизотропных горных пород алмазным инструментом подробно изложены в работах [1–9]. Анизотропия горной породы предопределяет неравномерность разрушения забоя и стенок скважины. Вследствие влияния дестабилизирующих равномерное вращение силовых факторов – опрокидывающего момента $M_{он}$ и дестабилизирующего усилия ΔF (9. С. 66, 71. формулы 2.38, 2.40) буровая коронка в процессе разрушения анизотропных горных пород находится в состоянии перекося и стремится реализовать вращение вокруг своей оси. Подобный вид движения бурового инструмента приводит к интенсивному искривлению скважины и отклонению ствола скважины от проектного направления.

Для устранения факторов, вызывающих искривление ствола скважины, может использоваться асимметричная форма торцевой части бурового инструмента. В качестве таковых известно применение алмазных коронок, конструкции которых защищены авторскими свидетельствами СССР № 1620590 [10], 1681598 [11] и 1752915 [12, 13]. Первая из них разработана в Томском политехническом университете В.В. Кривошеевым и получила название базированной коронки. Её разработка основывается на теории сверления глубоких отверстий Н.Д. Троицкого [1, 14].

Коронка, в соответствии с авторским свидетельством № 1681598 [11], включает цилиндрический корпус с резьбой и матрицу, насыщенную объемными и подрезными алмазами и разделенную на сектора промывочными пазами, причем один промывочный паз выполнен увеличенной ширины в сравнении с остальными, что обеспечивает наличие эксцентриситета торца матрицы. В данной коронке для компоновки бурового снаряда, в соответствии с авторским свидетельством № 2078193 [15], для сохранения ресурса коронки предложено увеличить насыщенность алмазами примыкающих к широкому пазу секторов матрицы на 25 %.

Недостатком коронки, выполненной в соответствии с авторскими свидетельствами № 1681598 [11], является нестабильность работы, так как наличие промывочного паса увеличенной ширины (90° центрального угла) приводит к перекося коронки в направлении этого паса, что вызывает как перегрузку и неравномерный износ секторов, примыкающих к широкому промывочному пазу, так и повышенную деформацию колонковой трубы над коронкой. В результате наблюдается снижение ресурса самой коронки и возрастает вероятность искривления ствола скважины.

При этом не учтено, что повышение ресурса нагруженных секторов матрицы можно получить не только за счет насыщенности алмазами, но и, безусловно, за счет повышения твердости самой матрицы.

Одним из направлений совершенствования буровых инструментов для снижения искривления стволов скважин, буримых в анизотропных горных породах, является создание инструментов с динамическими связями породоразрушающих элементов [16, 17].

Разработана новая алмазная коронка, защищенная заявкой на полезную модель (пат. № 148333) [18], которая учитывает основные недостатки известных технических решений.

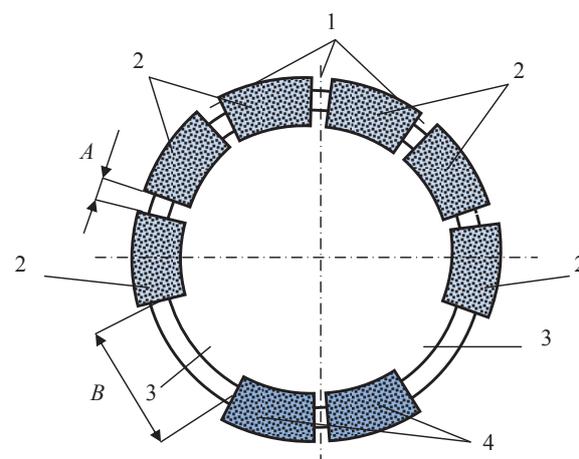


Рис. 1. Конструкция матрицы опытной алмазной коронки (КИТ) для бурения анизотропных горных пород: 1 – узкие промывочные каналы шириной A ; 2 – широкие промывочные сектора шириной B ; 3 – алмазосодержащие сектора; 4 – более твердые алмазные сектора

Fig. 1. A design of a matrix of a skilled diamond drill bit (crown) (KIT) for drilling anisotropic rocks: 1 – narrow flushing channels of width A ; 2 – wide flushing sectors of width B ; 3 – diamond-bearing sectors; 4 – firmer diamond sectors

Матрица предлагаемой опытной коронки (рис. 1) состоит из узких – 1 и широких – 2 промывочных пазов и алмазосодержащих секторов – 3, 4 равного размера. Промывочные пазы – 1 одного стандартного размера (шириной A) являются более узкими, а промывочные пазы – 2 более широкие (шириной B), чем промывочные пазы – 1. Ширина промывочных пазов – 2 может быть различна в разных моделях коронки, но неизменно больше, чем ширина промывочных пазов – 1. При этом пазы – 2 расположены в матрице коронки таким образом, что обеспечивается эксцентриситет торца матрицы относительно продольной оси буровой коронки, а это достигается тем, что число секторов – 3, 4 по обе стороны от промывочных пазов – 2 различно. Например, с одной стороны от широких промывочных пазов – 2 имеется восемь секторов – 3, а с другой в наличии всего два сектора – 4. При этом алмазосодержащие сектора – 4 имеют более высокую твердость, чем алмазосодержащие сектора – 3, причем твердость секторов – 4 опреде-

ляется соотношением S_6/S_m , где S_6 – площадь алмазосодержащих секторов – 3 на половине торца коронки с узкими промывочными пазми – 1, а S_m – площадь алмазосодержащих секторов – 4 на половине торца коронки с широкими промывочными пазми – 2.

Опытная коронка с измененной формой торца (КИТ) работает следующим образом.

При бурении, когда алмазная коронка воспринимает действие осевого усилия, алмазы секторов матрицы – 3, 4 внедряются в горную породу. Поскольку в матрице имеется два широких промывочных паза – 2, расположенных с одной стороны от торца матрицы, то торец матрицы коронки имеет геометрически смещенный центр тяжести поперечного сечения относительно геометрического центра поперечного сечения корпуса коронки (точка C на рис. 2), что приводит к более значительному нагружению при действии осевого усилия на коронку секторов – 4, в сравнении с секторами – 3. При этом сектора – 4 исключают перекося коронки до тех пор, пока сектора – 4 не получат опережающего, в сравнении с секторами – 3, износа. Именно с этой целью сектора – 4 следует изготавливать более твердыми. Наличие же эксцентриситета торца матрицы обеспечивает то, что при вращении коронки в процессе бурения будет задаваться вращение коронки вокруг оси скважины и исключается режим вращения с ориентированным перекося коронки, при котором может происходить максимальное искривление ствола скважины [9].

Ориентированный перекося торца коронки, вызванный изгибом колонкового снаряда и действием дестабилизирующих сил и моментов сил, исключается при бурении предлагаемой коронкой следующим образом.

Торец коронки (рис. 2) можно разделить на две части вдоль осевой линии $O-O$. Одна половина торца оснащена узкими стандартными промывочными пазми – 1, которыми разделены сектора – 3. Поскольку алмазы в секторах – 3 распределены равномерно, то при бурении, когда на коронку оказывает действие осевое усилие и коронка вращается на забое в направлении слева направо, равнодействующую F_1 единичных сил резания-скалывания породы этой частью торца можно поместить в виде вектора в центре тяжести половины кольца матрицы. Равнодействующая сил резания-скалывания породы на второй половине торца коронки F_2 также может быть направлена из центра тяжести этой половины торца. При этом очевидно, что $F_1 > F_2$, поскольку за счет наличия двух широких промывочных пазов – 2 число алмазных резов на этой половине торца коронки существенно меньше, чем на противоположной половине торца. В результате разность усилий приведет к появлению равнодействующей $F = F_1 - F_2$. Усилие F на схеме (рис. 2) будет располагаться в центре тяжести торца коронки и ориентировано в сторону большей силы – F_1 . Центр тяжести торца коронки при вращении инструмента при бурении становится

мгновенным центром вращения, что задает некоторые особенности динамики бурового инструмента, существенно влияющие на процесс формирования ствола скважины: вследствие прижатия коронки к стенке скважины возможно фрезерование стенки и керна и, соответственно, локальный износ самой коронки.

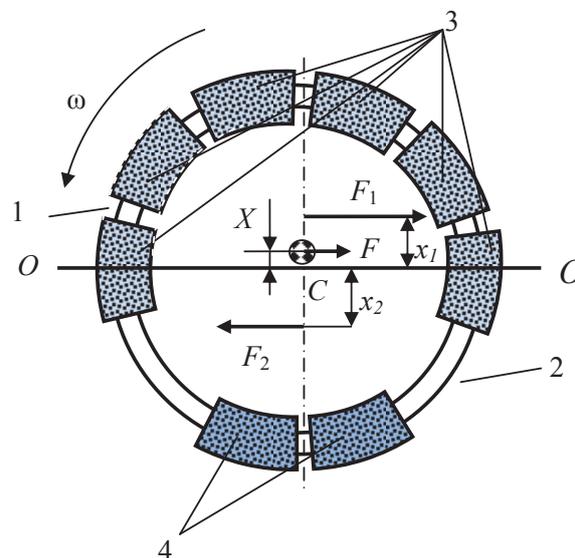


Рис. 2. Схема торца опытной коронки с распределением усилий резания-скалывания породы: X, x_1, x_2 – расстояния от центральной оси $O-O$ до центров тяжести торца матрицы и половинок торца матрицы; F, F_1, F_2 – усилия резания-скалывания породы: результирующее и соответственно для частей торца матрицы по обе стороны от центральной оси $O-O$

Fig. 2. The scheme of an end face of a test bit with distribution of efforts of rock destruction: X, x_1, x_2 are the distances from the central axis $O-O$ to the gravity centers of the matrix end face and halves of the matrix end face; F, F_1, F_2 are the efforts of rock cutting-shearing: the resultant one and respectively for the parts of the matrix end face on both sides from the central axis $O-O$

Величину усилия F можно связать с коэффициентом сопротивления породы разрушению алмазными резами μ_k [19].

Коэффициент сопротивления μ_k определяется по формуле [19]

$$\mu_k = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 n_p \sigma_{ск} + f}{2tg\gamma_{ск} P_{ос}}$$

где h – глубина внедрения в породу алмазного реза, м; d – диаметр алмазного реза, м; n_p – число активно работающих резов; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью реза, град; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, Н; f – коэффициент трения резов коронки о забой.

Усилие резания-скалывания породы всеми резами коронки при бурении будет определяться формулой

$$F_p = \mu_k P_{ос}$$

Таким образом, усилие F , вызванное дисбалансом торца опытной коронки при условии равномерного распределения алмазных резцов во всех секторах матрицы с учетом геометрических размеров торца, может определяться зависимостью

$$F = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{\text{ск}} S_{\text{т}} \left(\frac{n_6}{S_6} - \frac{n_m}{S_m} \right) + f \frac{P_{\text{ос}}}{S_{\text{т}}} (S_6 - S_m), \quad (1)$$

где $S_{\text{т}}$ – общая площадь торца алмазной коронки, м^2 ; S_6 – площадь алмазосодержащих секторов – 3 на половине торца коронки с узкими промывочными пазми – 1 (рис. 2); S_m – площадь алмазосодержащих секторов – 4 на половине торца коронки с широкими промывочными пазми – 2 (рис. 2); n_6, n_m – число алмазных резцов на половинах торцевой части матрицы, разделенных линией $O-O$ без широких промывочных каналов и с широкими промывочными каналами соответственно (рис. 2).

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ зависит от интенсивности разрушения горной породы, которая характеризуется при бурении углублением за один оборот. При углублении, равном нулю, когда разрушения практически не происходит, а режущие элементы перемещаются по поверхности забоя, не внедряясь в породу, коэффициент сопротивления снижается до минимума и становится равным коэффициенту трения f .

Таким образом, коэффициент трения характеризует взаимодействие коронки (резца) с породой при отсутствии разрушения и по известным данным [19] находится в пределах 0,02–0,13.

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$, по различным данным, изменяется в пределах 0,02–0,6 и при бурении алмазным инструментом соответствует интервалу величин 0,22–0,31 [19].

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ пропорционален величине углубления инструмента в породу за оборот и механической скорости бурения $v_{\text{м}}$. Например, данные, приведенные в работе [19], свидетельствуют о наличии пропорциональной зависимости, которая выражается формулой

$$\mu_{\text{к}} = 0,135 + 0,0285v_{\text{м}}. \quad (2)$$

При этом с увеличением частоты вращения коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ может несколько снижаться вследствие снижения глубины резания-скалывания породы резцами, а с повышением осевой нагрузки при заглублении резцов возрастать. Механическая скорость бурения может определяться как произведение углубления за один оборот коронки на забое $h_{\text{об}}$ и частоты вращения инструмента ω : $v_{\text{м}} = h_{\text{об}}\omega$. Таким образом, если при повышении частоты вращения происходит снижение углубления за один оборот коронки на забое, то скорость бурения при этом, как правило, возрастает вследствие роста частоты вращения инструмента, что и приводит к росту коэффициента $\mu_{\text{к}}$ в соответствии с зависимостью (2). При этом рекомендуется с повышением частоты вращения ин-

струмента ω несколько повышать и осевую нагрузку на инструмент $P_{\text{ос}}$ для сохранения оптимального углубления резцов коронки за один оборот.

Наличие силы F приводит к тому, что коронка при бурении будет стремиться прижиматься к стенке скважины боковой стороной корпуса и матрицей по направлению действия этой силы. В результате коронка даже под влиянием дестабилизирующих её вращение сил и моментов сил, вызванных неравномерным разрушением анизотропной горной породы [9], будет стремиться вращаться вокруг оси скважины, сохраняя контакт со стенкой скважины своей боковой поверхностью матрицы.

Величина усилия F для определенной модели алмазной коронки будет зависеть от ширины промывочных пазов – 2. По мере увеличения ширины B данное усилие будет возрастать. В этом случае будет расти и способность коронки к нейтрализации дестабилизирующих работу коронки в анизотропных породах сил и моментов сил, вызванных неравномерным разрушением горной породы.

Для изучения особенностей механизма работы опытной коронки было проведено экспериментальное бурение на буровом стенде.

Экспериментальные исследования включали определение физико-механических свойств горной породы – долерита – и бурение данной породы импрегнированной коронкой типоразмера NQ (наружный диаметр 76,2 мм) с тонкой матрицей (8 мм) – без изменения торцевой части (КНТ), и той же коронкой, но уже с измененным торцом матрицы (КИТ). Компоновка для опытного бурения с коронкой КНТ показана на рис. 3.

Бурение осуществлялось на буровом стенде, который оборудован буровым станком СКБ-4 и буровым насосом НБ-3. Буровой станок установлен на эстакаде высотой около 2 м. Под станком оборудован приямок для размещения блока горной породы размером 0,7×0,7×0,7 м и средств закрепления блока породы. Буровой станок оборудован киловаттметром для измерения мощности на бурение и прибором для измерения механической скорости бурения типа ИСБ. Перед проведением эксперимента показания значений осевого усилия прибором бурового станка тарировались лабораторным динамометром системы Токаря ДОС грузоподъемностью 50 кН, что позволило на 5 % повысить точность измерения осевого усилия на буровую коронку.

Бурение горной породы осуществлено с применением в качестве промывочной жидкости воды и эмульсии (жидкое мыло концентрацией 0,12 %). В процессе бурения фиксировалось время бурения интервала с помощью секундомера и параллельно велась фиксация механической скорости проходки прибором ИСБ. Наряду с механической скоростью бурения фиксировались затраты мощности на бурение при различных параметрах режима. Опытное бурение планировалось и выполнялось в соответствии с методикой полного факторного эксперимента (ПФЭ) [20]. В результате эксперимента были получены достоверные данные о механиче-

ской скорости бурения, затратах мощности и энергоёмкости бурения, углублении за один оборот коронки на забое, диаметре получаемого керна и точки прилегания коронки к стенке скважины при различных значениях осевого усилия и частоты вращения. Количество подаваемой буровой жидкости в пределах эксперимента оставалось неизменным – 40 л/мин.

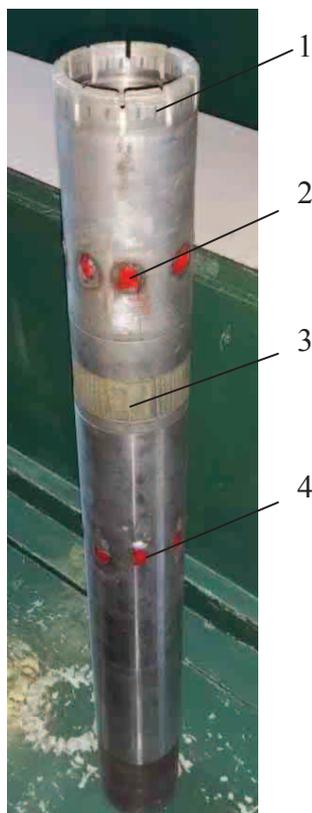


Рис. 3. Компонка для опытного бурения: 1 – коронка; 2 – наплавки для исследования места прижатия коронки к стенке скважины; 3 – расширитель; 4 – наплавки

Fig. 3. Configuration for test drilling: 1 is the drill bit; 2 are the weldings for determining a place of a crown pressing to a well wall; 3 is the dilator; 4 are the weldings

Определение прочностных свойств горной породы

Твердость и иные свойства горных пород существенно зависят от внешней среды. Для установления влияния внешней среды на твердость горной породы проведены эксперименты на приборе УМГП-3 в соответствии со стандартной методикой (ГОСТ 12288–66) [18].

При определении механических свойств горных пород применялись цилиндрические инденторы с плоским основанием диаметром 1,8 мм. Исследуемая порода – долерит (упруго-хрупкая порода). Использовались образцы в виде кубов со стороной 40 мм. Вдавливание инденторов производилось в трёх различных средах: воздух, вода, эмульсия (жидкое мыло концентрацией 0,12 %). Методические основы данного эксперимента изложены в работе [19].

Результаты экспериментальных работ приведены в табл. 1.

Эксперимент показал, что наибольшее влияние на изменение твердости и иных свойств долерита имеет эмульсия. Под влиянием эмульсии существенно понижаются твердость $p_{ш}$, коэффициент пластичности $K_{пл}$, жесткость C , модуль упругости породы E , а также удельная контактная работа разрушения A_s , но повышается условный предел текучести p_0 .

Таблица 1. Экспериментальные зависимости свойств горных пород от воздействия среды, заданной условиями эксперимента

Table 1. Experimental dependences of rock features on the impact of the experimental medium

| Среда Medium | Воздух Air | Вода Water | Эмульсия Emulsion |
|---|---------------|---------------|----------------------|
| $p_{ш}$, МПа (MPa) | 3156 | 2831 | 2438 |
| $K_{пл}$ | 1,5 | 1,4 | 1,2 |
| C , даН/мм (daN/mm) | 6527,7 | 5373,8 | 4030,1 |
| E , МПа (MPa) | 36265 | 29855 | 22389 |
| p_0 , МПа (MPa) | 2117 | 2374 | 2078 |
| A_s , Дж/м ² (J/m ²) | 897 | 818 | 693 |

Экспериментальное исследование буримости долерита стандартной – КНТ, и опытной – КИТ, коронками выполнено в соответствии с планом полного факторного эксперимента [20] типа $N=2^k$, где N – число достаточных для получения достоверных результатов опытов; k – число учитываемых при эксперименте факторов. В качестве откликов были замерены:

- механическая скорость бурения v_m , м/ч;
- углубление за один оборот $h_{об}$, мм/об;
- энергоёмкость бурения N/v_m , кВт·ч/м;
- мощность на бурение N , кВт;
- диаметр керна d_k , мм;
- угол смещения точки контакта корпуса коронки со стенкой скважины Δ , град.

В качестве влияющих на процесс бурения факторов приняты: осевая нагрузка $P_{ос}$, которая устанавливалась равной 1000 и 1400 даН, и частота вращения ω , 435 и 710 мин⁻¹. Таким образом, число достаточных опытов N в пределах каждого эксперимента равнялось четырем. Сочетания выбранных параметров позволили устанавливать четыре режима бурения: режим 1 ($\omega=435$, мин⁻¹; $P_{ос}=1000$ даН); режим 2 ($\omega=435$, мин⁻¹; $P_{ос}=1400$ даН); режим 3 ($\omega=710$, мин⁻¹; $P_{ос}=1000$ даН); режим 4 ($\omega=710$, мин⁻¹; $P_{ос}=1400$ даН). Таким образом, в соответствии с методикой ПФЭ использованы четыре варианта сочетания параметров режима бурения, для которых получены соответствующие значения вышеуказанных откликов.

В результате обработки данных получены следующие эмпирические уравнения, отражающие основные аспекты процесса бурения долерита стандартной коронкой КНТ с применением в качестве очистного агента воды:

$$v_m = 11,08 + 1,36P_{oc} + 2,54\omega + 0,32P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,32 + 0,04P_{oc} - 0,004\omega - 0,0002P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,02 - 0,025P_{oc} - 0,13\omega - 0,01P_{oc}\omega,$$

где P_{oc} , ω – значения параметров режима бурения (факторов) в закодированном выражении (-1 – для минимальных, $+1$ – для максимальных значений параметров факторов P_{oc} и ω , в установленных плане эксперимента значениях).

При бурении коронкой КНТ с применением эмульсии получены несколько иные уравнения:

$$v_m = 11,6 + 1,99P_{oc} + 2,5\omega + 0,57P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,34 + 0,057P_{oc} - 0,009\omega - 0,0003P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,0635P_{oc} - 0,0735\omega - 0,012P_{oc}\omega.$$

Анализ полученных данных показал, что достигается очень высокая механическая скорость бурения коронкой КНТ (более 15 м/ч), которая возрастает при применении эмульсии. На формирование скорости бурения оказывает более высокое влияние частота вращения, что вполне характерно для бурения алмазным буровым инструментом. Соответственно достигается высокое углубление инструмента за один оборот, которое выше при бурении с применением эмульсии. Повышение осевой нагрузки приводит к росту углубления за один оборот, а рост частоты вращения без повышения осевой нагрузки – к снижению углубления за оборот коронки на забое. В целом процесс характеризуется объемным разрушением породы на всем интервале применяемых параметров режима бурения. Уравнение энергоёмкости разрушения показывает – с повышением параметров режима бурения достигается столь высокая механическая скорость, что энергоёмкость бурения снижается, достигая минимальных значений именно при максимальных параметрах режима бурения.

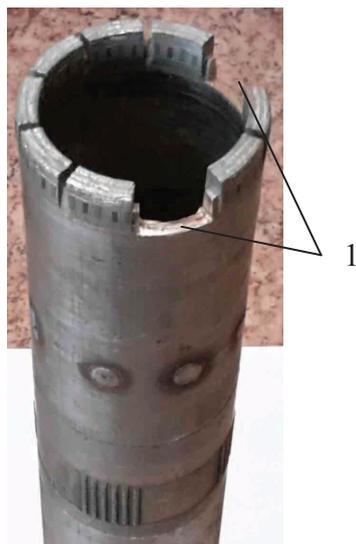


Рис. 4. Опытная коронка КИТ: 1 – широкие промывочные каналы, полученные путем удаления двух алмазосодержащих секторов

Fig. 4. Test crown: 1 are the wide flushing channels obtained by removing two diamond-bearing sectors

После проведения эксперимента с коронкой КНТ конструкция матрицы данной коронки была изменена, а именно удалено два рабочих алмазосодержащих сектора (рис. 4). Данная коронка получила условное название КИТ. Коронкой КИТ осуществлено бурение долерита при использовании тех же параметров режима бурения с целью сравнения результатов бурения коронками КНТ и КИТ. В результате получены следующие эмпирические уравнения при использовании в качестве очистного агента воды:

$$v_m = 12,08 + 2,12P_{oc} + 2,49\omega + 0,45P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,355 + 0,062P_{oc} - 0,013\omega - 0,002P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,083P_{oc} - 0,1\omega + 0,012P_{oc}\omega.$$

При бурении с применением эмульсии получены иные уравнения:

$$v_m = 12,32 + 2,48P_{oc} + 2,54\omega + 0,66P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,36 + 0,072P_{oc} - 0,013\omega - 0,0021P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,078P_{oc} - 0,103\omega + 0,003P_{oc}\omega.$$

В целом характер работы алмазной коронки после удаления секторов – 1 (рис. 4) не изменился. Механическая скорость бурения увеличилась, повысилась углубление за один оборот коронки на забое, энергоёмкость бурения изменилась незначительно, что указывает на такие условия бурения, которые не могут привести к снижению ресурса бурового инструмента. В то же время результаты эксперимента указывают на то, что затраты мощности на бурение опытной коронкой несколько увеличились. Действительно, если сравнить показания киловаттметра по измерению затрат мощности на бурение и обработать эти данные в соответствии с методикой полного факторного эксперимента, то можно получить следующие уравнения бурения долерита коронкой КИТ (неизменная форма торца) для условий бурения с водой:

$$N = 10,9 + 0,025P_{oc} + 1,125\omega - 0,025P_{oc}\omega$$

и эмульсией:

$$N = 11,15 + 1,18P_{oc} + 1,58\omega + 0,125P_{oc}\omega.$$

Для коронки с измененной формой торца (КИТ) аналогичные уравнения имеют следующий вид:

$$N = 11,73 + 1,125P_{oc} + 1,275\omega + 0,175P_{oc}\omega;$$

$$N = 12,0 + 1,5P_{oc} + 1,25\omega + 0,25P_{oc}\omega.$$

Первое из приведенных выше уравнений получено по данным бурения с применением в качестве очистного агента воды, второе – эмульсии.

Из данных уравнений в соответствии со значениями коэффициентов при факторах P_{oc} и ω следует, что при бурении коронкой КНТ с применением воды основное влияние на затраты мощности оказывает частота вращения, но при бурении с применением эмульсии различие между влиянием осевого усилия и частоты вращения сглаживается, хотя по-прежнему преобладает влияние частоты вращения. Последнее связано с тем, что применение эмульсии снижает твердость горных пород на забое скважины и роль осевого усилия при разрушении долерита возрастает. При этом энергоёмкость бурения при использовании эмульсии выше (в среднем на 2,2 %).

Бурение опытной коронкой КИТ показало рост энергоёмкости на бурение в сравнении с коронкой КНТ в среднем на 7,6 % как при бурении с водой, так и при бурении с эмульсией. Бурение с переходом с воды на эмульсию увеличило энергоёмкость на 2,3 %, что аналогично такому же показателю для коронки КНТ. При этом данные эксперимента показали, что различие в затратах мощности ΔN

на бурение стандартной и опытной коронками возрастает с повышением как осевого усилия, так и частоты вращения. По имеющимся данным получены уравнения влияния основных факторов – осевого усилия и частоты вращения на разность затрат мощности (ΔN) при бурении коронкой КИТ в сравнении с затратами мощности на бурение коронкой КНТ.

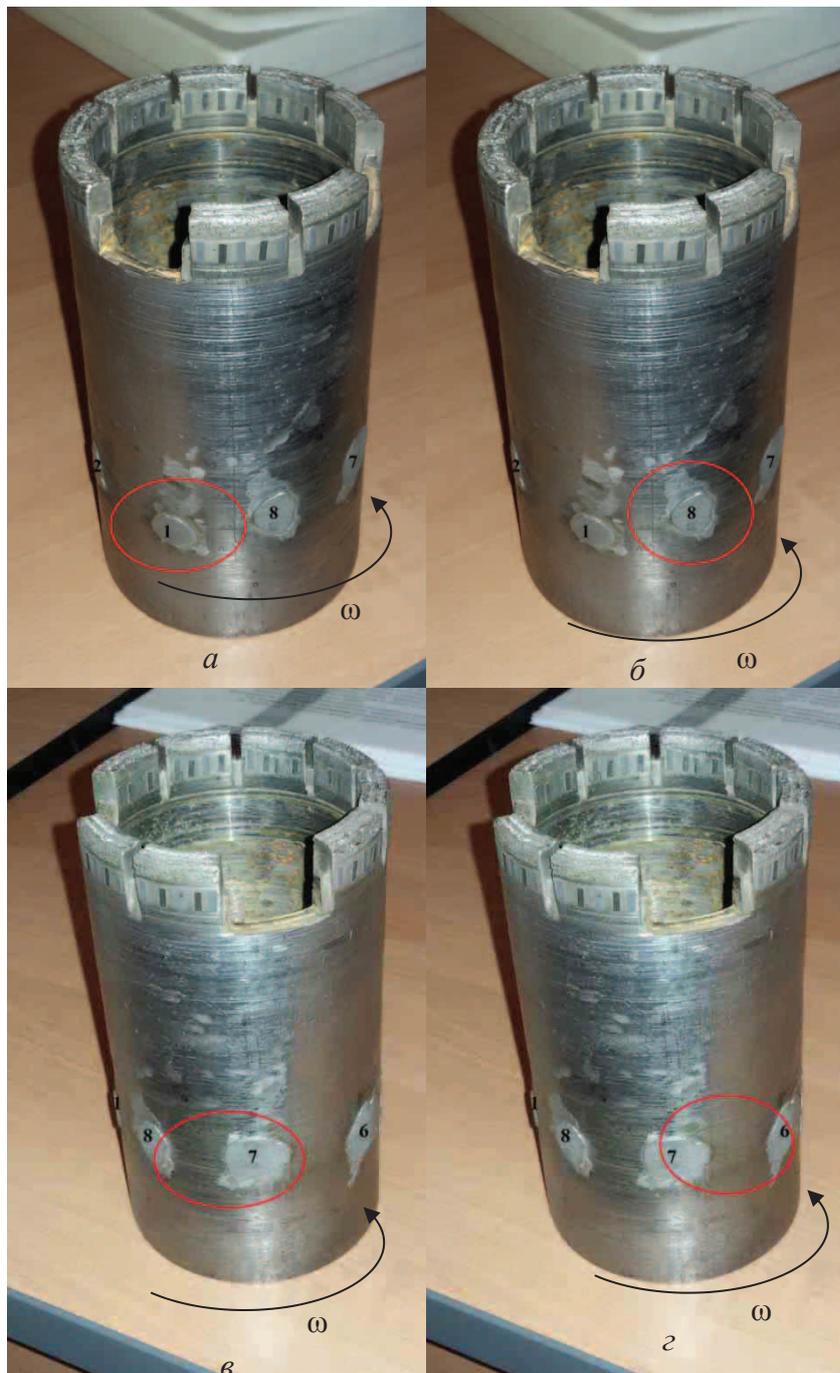


Рис. 5. Пятна контакта корпуса буровой коронки со стенкой скважины при бурении в условиях эксперимента. Режим бурения: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4 (табл. 2 и 3); стрелкой показано направление вращения коронки

Fig. 5. Spots of a drill bit case contact with a well wall when drilling in experimental conditions. Drilling mode: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4 (table 2 and 3); a drill bit rotation direction is marked with an arrow

При бурении с водой уравнение имеет следующий вид:

$$\Delta N = 0,85 + 0,1P_{oc} + 0,15\omega + 0,2P_{oc}\omega.$$

При бурении с эмульсией уравнение выглядит иначе:

$$\Delta N = 0,68 + 0,33P_{oc} - 0,325\omega + 0,125P_{oc}\omega.$$

Анализ вышеприведенных уравнений показывает, что если в первом случае разность затрат мощности при бурении коронкой КИТ в сравнении с бурением коронкой КНТ связана как с влиянием осевого усилия и частоты вращения, при опережающем влиянии именно второго фактора, то при бурении с эмульсией основной рост вызван именно влиянием осевой нагрузки, а рост частоты вращения приводит к противоположному действию – затраты мощности на бурение под влиянием растущей частоты вращения стали снижаться. Данный результат можно объяснить только снижением твердости горных пород на забое скважины и повышением глубины внедрения резцов в породу, что проявилось в повышении роли осевого усилия и в снижении сил трения коронки о забой и стенку скважины. В результате, видимо, изменился режим работы коронки и снизились силы её прижатия к стенке скважины.

Исследование износа керна, полученного при бурении коронками КНТ и КИТ, показало следующее:

- керн, полученный при бурении стандартной коронкой и при использовании в качестве очистного агента воды, имеет диаметр 61,25 мм, а при бурении с эмульсией – 61,4 мм;
- керн, полученный при бурении опытной коронкой и при использовании в качестве очистного агента воды, имеет диаметр 60,0 мм, а при бурении с эмульсией – 61,25 мм.

Таким образом, отмечено снижение диаметра керна при бурении опытной коронкой, что указывает на режим бокового фрезерования керна. Очевидно, что некоторое расширение получил и ствол скважины при бурении коронкой КИТ.

Построение эмпирического уравнения с учетом влияния факторов позволило отметить уровень влияния осевого усилия и частоты вращения коронки на диаметр керна:

$$d_k = 61,025 - 0,025P_{oc} - 0,05\omega.$$

В данном случае отмечается более существенное влияние на уменьшение диаметра керна (на фрезерующую способность коронки) частоты вращения (в 2 раза), что предопределено более значительным влиянием этого фактора на μ_k – коэффициент сопротивления резанию-скалыванию породы, и соответственно величину дисбалансной силы F (формула (1)).

С целью уточнения механизма работы алмазной коронки типа КИТ проведены **наблюдения износа боковой наружной поверхности коронки**. В данном случае ставилась задача определить место контакта боковой поверхности и матрицы коронки со стенкой скважины и перемещение точки

контакта при изменении параметров режима бурения. Для решения поставленной задачи на корпусе коронки были сделаны 8 наплавов методом сварки размером примерно 1,5×1,5 см (рис. 3, позиция 2; рис. 5). Наплавки выступали за пределы корпуса коронки на величину не большую, чем радиальный зазор (половина диаметров матрицы и корпуса коронки). Пятно контакта буровой коронки со стенкой скважины можно выявить по максимальному значению износа наплавов.

Результаты измерений толщины каждой наплавки прибором БВ-2027 указаны в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений высоты наплавов на корпусе коронки КИТ

Table 2. Results of measuring welding height on the case of KIT bit

| № наплавки на корпусе коронки Welding on a bit case | Исходный размер, мм Original size, mm | Режим бурения/Drilling mode | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | | $\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$ | $\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$ | $\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$ | $\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$ |
| 1 | 0,773 | 0,631 | 0,537 | 0,521 | 0,498 |
| 2 | 0,701 | 0,628 | 0,597 | 0,564 | 0,532 |
| 3 | 0,532 | 0,5 | 0,456 | 0,452 | 0,429 |
| 4 | 0,582 | 0,543 | 0,54 | 0,506 | 0,456 |
| 5 | 0,432 | 0,43 | 0,427 | 0,423 | 0,403 |
| 6 | 0,547 | 0,517 | 0,497 | 0,488 | 0,387 |
| 7 | 0,863 | 0,82 | 0,748 | 0,614 | 0,503 |
| 8 | 0,698 | 0,614 | 0,497 | 0,389 | 0,351 |

Таблица 3. Величины износа наплавов на корпусе коронки КИТ

Table 3. Rates of welding wear on a KIT bit case

| № наплавки на корпусе коронки Welding on a bit case | Величина износа наплавов на корпусе коронки, мм Rate of welding wear on a bit case, mm | | | |
|--|---|--|--|--|
| | Режим бурения/Drilling mode | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | $\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$ | $\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$ | $\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$ | $\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$ |
| 1 | 0,142 | 0,094 | 0,016 | 0,02 |
| 2 | 0,073 | 0,031 | 0,033 | 0,003 |
| 3 | 0,032 | 0,044 | 0,004 | 0,023 |
| 4 | 0,039 | 0,003 | 0,105 | 0,025 |
| 5 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,002 |
| 6 | 0,03 | 0,02 | 0,009 | 0,101 |
| 7 | 0,043 | 0,072 | 0,134 | 0,111 |
| 8 | 0,084 | 0,117 | 0,108 | 0,038 |

Величины износа наплавов на буровой коронке на каждом этапе экспериментальных исследований представлены в табл. 3. Максимальные значения износа наплавов на корпусе коронки выделены жирным шрифтом. Анализ результатов экспериментов показал, что место контакта матрицы и корпуса коронки КИТ со стенкой скважины наблюдается со стороны удаленных секторов матрицы. При этом если при минимальных значениях осевого усилия и частоты вращения (режим 1) точ-

ка прилегания коронки совпадает с наплавкой (контрольная точка) № 1, то по мере повышения частоты вращения и осевого усилия точка контакта перемещается по направлению вращения коронки от наплавки № 1 к наплавке № 8 и далее к наплавкам № 7 и 6 (рис. 5, 6).

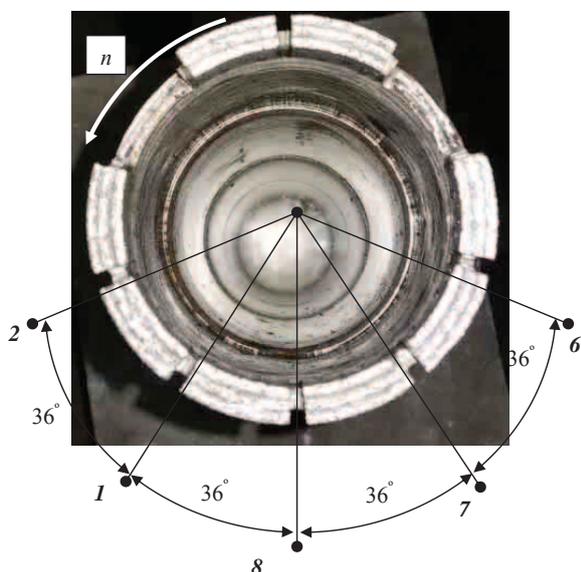


Рис. 6. Торцевая часть опытной коронки КИТ: 1, 2, 6, 7, 8 – номера наплавки на корпусе коронки, получившие максимальный износ в процессе эксперимента; n – направление вращения коронки при бурении

Fig. 6. Face part of the test bit: 1, 2, 6, 7, 8 are the weldings on the bit case which have maximum wear in the course of the experiment; n is the direction of the bit rotation when drilling

Обработка данных эксперимента по изучению влияния параметров режима бурения на миграцию точки контакта осуществлена с использованием полного факторного эксперимента, аналогичного при исследовании буримости долерита базовой и опытной коронками. В качестве отклика принят угол смещения пятна контакта Δ . За начало отсчета угла Δ принято положение наплавки № 2, которое совпадает с краем первого по направлению вращения широкого промывочного канала. Влияющими на угол Δ факторами остались действующие в условиях эксперимента осевая нагрузка P_{oc} и частота вращения ω . В результате обработки данных получено уравнение зависимости угла смещения точки контакта матрицы и корпуса коронки от параметров режима бурения:

$$\Delta = 81,5 + 13,5P_{oc} + 28,5\omega - 3,5P_{oc}\omega. \quad (3)$$

Эмпирическая модель (3) указывает на то, что влияние частоты вращения на смещение пятна контакта более чем в два раза значительнее в сравнении с влиянием осевого усилия. При этом полученный результат полностью соответствует данным о влиянии параметров режима бурения на изнашивание керна и указывает, прежде всего, на повышение дисбаланса сил сопротивления резанию-скалыванию породы резцами буровой коронки КИТ, что приводит к повышению силы прижатия матрицы и корпуса коронки к стенке скважины и к провороту коронки под действием изменяющихся внешних сил резания-скалывания породы и прижатия к стенке скважины.

Опытные работы показали, что предлагаемая коронка и без усиления алмазосодержащих секторов – 4 (рис. 1) показывает высокую работоспособность, а результаты испытаний позволяют выполнить дополнительные усовершенствования конструкции новой коронки. При этом выявлен механизм работы опытной коронки и в целом подтверждены результаты теоретического анализа.

Выводы

1. Опытная коронка, разработанная для условий бурения скважин в твердых анизотропных горных породах, в условиях экспериментального бурения показала свою высокую работоспособность.
2. Полученные результаты экспериментальных работ подтвердили ранее выполненный теоретический анализ о возможности изменения динамики буровой коронки и позволили уточнить механизм работы опытной коронки при применении различных параметров режима бурения с использованием в качестве очистного агента как воды, так и эмульсии.
3. Установлена важная зависимость изменения точки прилегания коронки к стенке скважины при варьировании параметрами режима бурения, что позволяет провести более точное усиление бокового вооружения коронки для изменения её фрезерующей способности.
4. Новые данные о механизме работы коронки будут использоваться для усовершенствования конструкции опытного образца коронки, что позволит получить более совершенный буровой инструмент для колонкового бурения твердых анизотропных горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с.
2. Боярко Ю.Л. Борьба с искривлением скважин. – Томск: Изд-во ТПИ, 1969. – 110 с.
3. Калинин А.Г. Искривление скважин. – М.: Недра, 1974. – 294 с.
4. Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction // Oil and gas J. – 1975. – V. 73. – № 31. – P. 77–80.
5. Морозов Ю.Т. Бурение направленных и многоствольных скважин малого диаметра. – М.: Недра, 1976. – 211 с.
6. Колесников А.Е. Механизм искривления скважин. – Орджоникидзе, 1983. – 48 с. – Деп. В ЦНИИЭИцветмет 01.11.83, № 1080 цм – Д83.
7. Боголюбовский К.А., Зиненко В.П., Кирсанов А.Н. Процесс естественного искривления скважин вращательного бурения в анизотропной среде // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 110–116.
8. Зиненко В.П. Направленное бурение. – М.: Недра, 1990. – 152 с.
9. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
10. Кривошеев В.В. Алмазная буровая коронка. Авторское свидетельство СССР № 162090, опубл. 15.01.91, Бюл. 17.
11. Карпиков А.В. Научно-методические основы управления интенсивностью естественного искривления скважин: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2002. 179 с.
12. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спиринов В.И. Алмазный инструмент для бурения направленных и многоствольных скважин. – Тула: Изд-во ЗАО «Гриф и К», 2007. – 176 с.
13. Буровой инструмент / Б.В. Алешин, А.М. Никаноров, А.А. Черных и др. Авторское свидетельство СССР № 1752915. Опубл. 07.08.92. Бюл. 25.
14. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 135 с.
15. Алмазная коронка для компоновки бурового снаряда: пат. Рос. Федерация № 2078193; заявл. 21.07.93; опубл. 27.04.97, Бюл. № 16.
16. Буровая алмазная коронка: пат. Рос. Федерация № 2167261; заявл. 16.03.00; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.
17. Буровой инструмент: пат. Рос. Федерация № 2246603; заявл. 12.08.03; опубл. 20.02.05, Бюл. № . – 7.
18. Алмазная коронка для бурения: пат. Рос. Федерация № 148333; заявл. 05.08.14; опубл. 10.12.14, Бюл. № . – 46.
19. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – 328 с.
20. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

Поступила 13.01.2015 г.

UDC 622.243

DEVELOPMENT AND PILOT STUDIES OF THE FEATURES OF A DIAMOND DRILL CROWN OPERATION WHEN DRILLING IN SOLID ANISOTROPIC ROCKS

Vyacheslav V. Neskoromnykh,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

Pavel G. Petenev,

Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: pavel-whait@mail.ru

Alexander L. Neverov,

Cand. Sc., Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Pavel S. Pushmin,

Cand. Sc., Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 683074, Russia. E-mail: pps@istu.edu

Grigory R. Romanov,

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 683074, Russia. E-mail: grom123456@mail.ru.

Relevance of work is caused by need of a solution of the problem of increase of efficiency of drilling of deep wells for solid anisotropic rocks.

Work purpose: Research and development of new model of a diamond drill bit for drilling of solid anisotropic rocks.

Research methods: Analytical researches and experimental works new diamond crown at the boring stand.

Results: The model of the new diamond crown allowing to realize drilling of anisotropic rocks is developed. Data of the analytical analysis and technique of experimental works at the boring stand are submitted. Skilled drilling is carried out by a new crown which showed features of mechanics of work of a skilled crown that allows to carry out improvement of a design of the boring tool. Are determined consistent patterns of influence of parameters of the mode of drilling on character and intensity of wear of a crown, mechanical speed of drilling, power consumption of process of drilling.

Conclusions. The skilled crown developed for conditions of drilling of wells in solid anisotropic rocks in the conditions of experimental drilling showed the high performance. The received results of experimental works confirmed the analysis and allowed to specify the mechanism of work of a skilled crown at various parameters of the mode of drilling with application as the clearing agent as waters, and emulsions. New data on the mechanism of work of a crown will be used for a crown prototype design creation of the perfect that will allow to receive more perfect boring instrument for drilling of solid anisotropic rocks.

Key words:

Rock, drilling, experiment, diamond crown, destruction.

REFERENCES

1. Krivocheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Curvature of wells in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
2. Boyarko Ya.L. *Borba s iskrivleniem skvazhin* [Fight against a curvature of wells]. Tomsk, TPI Publ., 1969. 110 p.
3. Kalinin A.G. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 294 p.
4. Bradley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction. *Oil and gas J.*, 1975, vol. 73, no. 31, pp. 77–80.
5. Morozov Yu.T. *Burenie napravlennykh skvazhin i mnogostvolnykh skvazhin malogo diametra* [Drilling of the directional wells and multilayer wells of small diameter]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 211 p.
6. Kolesnikov A.E. *Mekhanizm skrivleniya skvazhin* [Mechanism of a well curvature]. Ordzhonikidze, 1983. 48 p. Dep. v TSNIIEIzhvetmet 01.11.83, № 1080 zhm – D83.
7. Bogolyubskiy K.A., Zinenko V.P., Kirsanov A.N. Protseess estestvennogo iskrivleniya skvazhin vrashchatelnogo burenia v anizotropnoy srede [Well natural curvature of rotary drilling in anisotropic environment]. *Izvestiy vuzov. Geologiya i razvedka*, 1974, no. 3, pp. 110–116.
8. Zinenko V.P. *Napravlennoe burenie* [The directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 152 p.
9. Neskromnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [The directed drilling and bases of core orient]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 328 p.
10. Krivocheev V.V. *Almaznaya burovaya koronka* [Diamond drill bit]. The author certificate of the USSR, no. 162090, 1991.
11. Karpikov A.V. *Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya intensivnostiyu estestvennogo iskrivleniya skvazhin. Dis. Kand. nauk* [Scientific and methodical bases of management of a well natural curvature intensity. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2002. 179 p.
12. Budyukov Yu.E., Vlasyuk V.I., Spirin V.I. *Almazny instrument dlya bureniya napravlennykh i mnogostvolnykh skvazhin* [The diamond tool for drilling the directional and multilayered wells]. Tula, Publ. house of JSC Grif i C°, 2007. 176 p.
13. Aleshin B.V., Nikanorov A.M., Chernykh A.A. *Burovoy instrument* [Boring tool]. Author certificate of the USSR, no. 1752915, 1992.
14. Troitzky N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 135 p.
15. Kozlovsky E.A., Buglov N.A., Novozhilov B.A. *Almaznaya koronka dlya komponovki burovogo snaryada* [A diamond bit for configuration of a boring shell]. Patent RF, no. 2078193, 1997.
16. Neskromnykh V.V., Bolshakov V.V., Kostin Yu.S. *Almaznaya burovaya koronka* [Drill diamond bit]. Patent RF, no. 2167261, 2001.
17. Neskromnykh V.V., Purevsuren R. *Burovoy instrument* [Boring tool]. Patent RF, no. 2246603, 2005.
18. Spirin V.I., Budyukov Yu.E., Neskromnykh V.V. *Almaznaya koronka dlya burenia* [Diamond bit for drilling]. Patent RF, no. 148333, 2014.
19. Neskromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri bureanii skvazhin* [Destruction of rocks when drilling wells]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 328 p.
20. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning the experiment by searching the optimum conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.

Received: 13 January 2015.

УДК 624.131

ПРИРОДНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «СИЛА СИБИРИ» НА УЧАСТКЕ ЧАЯНДИНСКОЕ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ – ЛЕНСК

Строкова Людмила Александровна,
д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной
геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов
ФБГАУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: strokova@sibmail.com

Ермолаева Алёна Викторовна,
аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии
и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ФБГАУ ВПО
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: alyona7@inbox.ru

Актуальность работы связана с ростом аварийности на линейной части магистральных газопроводов, обусловленной воздействием природных и техногенных факторов, в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, пересеченной местности и т. п.
Цель работы: описание природных зональных и региональных геологических факторов инженерно-геологических условий территории проектируемого газопровода «Сила Сибири» на участке Чаянда–Ленск, определение классификационных признаков дефектов магистральных газопроводов, вызываемых инженерно-геологическими факторами, и распространенных в районе производства работ; выявление основных опасных инженерно-геологических процессов, характерных для района производства работ, и оказывающих непосредственное влияние на систему трубопровод–грунт.

Методы исследования: анализ материалов инженерно-геологических изысканий для проектирования объектов линейной инфраструктуры магистрального газопровода «Сила Сибири», выполненных ФГУП «ВостСиб АГП», ООО «Ингеоком», ООО «Промнефтегазпроект», ОАО «Фундаментпроект», ЗАО «НПФ «ДИЭМ»; сбор и обработка материалов прошлых лет, статистических данных по аварийности магистральных газопроводов ОАО «Газпром» на линейной части, вследствие опасных геологических процессов, природных и иных техногенных факторов.

Результаты. Рассмотрены климатические, геоморфологические особенности места проектирования газопровода «Сила Сибири». Приведено описание как инженерно-геологических формаций коренных пород, так и характеристика геолого-генетических комплексов четвертичных отложений. Произведена оценка влияния воздействия геокриологических условий строительства и экзогенных процессов на проектируемый объект. Предложена классификация дефектов магистральных газопроводов, вызываемых опасными геологическими, инженерно-геологическими процессами. Определены ключевые причины и факторы процессов, в соответствии с предложенной классификацией, оказывающих непосредственное влияние на эксплуатационную надежность трубопроводов.

Ключевые слова:

Магистральные газопроводы, дефекты, горные породы, опасные геологические процессы, карст, заболачивание.

Российская газопроводная система является одной из крупнейших в мире, в 2012 г. протяженность линейной части магистральных газопроводов составляла более 175 тыс. км. В настоящее время на территории Российской Федерации реализуется ряд крупнейших газотранспортных проектов («Северный поток», «Сахалин-I», «Сахалин-II», «Сила Сибири» и др.), включающих многие километры новых магистральных газопроводов [1].

Эксплуатация магистральных газопроводов сопряжена с работой в сложных динамических, инженерно-геологических, природно-климатических условиях, нередко приводящих к авариям. По обобщенным данным научных и технологических исследований и официальным данным ОАО «Газпром» 42 % всех аварий на линейной части магистральных газопроводов обусловлено прямым или косвенным воздействием природных факторов. В том числе 16 % обусловлено внешней общей коррозией, 12 % – экзогенными процессами, в т. ч.

3 % – в результате изменений геокриологических условий, 13 % – стресс-коррозионными явлениями, 1 % – другими естественными факторами [2].

В работе приведено описание инженерно-геологических условий территории по трассе магистрального газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск, протяженностью 160 км (рис. 1). Трасса расположена на территории Ленского улуса Республики Саха (Якутия).

Комплексные инженерные изыскания в пределах изучаемого участка трассы были выполнены в 2010–2012 гг. ФГУП «ВостСиб АГП», ООО «Ингеоком», ООО «Промнефтегазпроект», ОАО «Фундаментпроект», ЗАО «НПФ «ДИЭМ», ИФЗ РАН О.Ю. Шмидта [3]. Результаты этих изысканий положены в основу приведенного ниже обзора.

В климатическом отношении участок трассы магистрального газопровода проходит в условиях резко-континентального климата с умеренно-те-



Рис. 1. Карта-схема расположения участка работ [3]

Fig. 1. Map of the area

плым летом и суровой, относительно малоснежной зимой. Основными факторами, определяющими характер климата, являются: удаленность и отгороженность горными системами от Атлантического и Тихого океанов, открытость со стороны Северного Ледовитого океана, сложность орографии.

Зимой вся территория охлаждена, что способствует развитию с октября по март устойчивого мощного антициклона (Азиатский максимум). Он начинает формироваться в октябре, достигает максимума в январе, а разрушается с марта. Господствуют холодные континентальные арктические и умеренные воздушные массы. Погода преимущественно ясная, безветренная, с низкой температурой. Средняя температура января составляет от $-25,2$ до -34 °С. Иногда морозы достигают -62 °С. Переход от зимы к весне обычно резкий при значительной разнице низких ночных и высоких дневных температур воздуха, особенно в безоблачные сутки. Летом в связи с прогреванием над территорией устанавливается пониженное давление. Средняя температура июля составляет $12-16$ °С. Осень, как и весна, очень коротка и наступает сразу, переходя от теплых летних суток к постоянным ночным заморозкам.

В холодный период (ноябрь–март) выпадает 85–116 мм осадков, в летне-осенний период (апрель–октябрь) их количество увеличивается до 262–294 мм. Годовое количество осадков составляет 346–409 мм большая их часть (72–75 %) выпадает в теплый период. Общее количество осадков, выпадающих в виде снега, составляет около 25 % от годового значения.

Снежный покров появляется в первой–второй декаде октября и окончательно формируется к концу месяца. Зима в целом малоснежная. Незначительный снежный покров и исключительно низкие зимние температуры способствуют широкому распространению многолетней мерзлоты. Высота снежного покрова в среднем составляет 30–50 см.

Направление ветра в бассейнах рек соответствует в основном расположению долин. На остальной территории зимой преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений, летом чаще всего наблюдаются ветры северного, западного и северо-западного направлений. Среднее годовое значение скорости ветра по данным метеостанций Витим и Ленск составляет 2,4–2,6 м/с.

Число дней с туманом за год для метеостанции Витим составляет 65, для метеостанции Ленск – 41. Большое количество метелей в районе наблюдается в периоды, когда азиатский антициклон находится в стадии формирования. Среднее за год число дней с метелью составляет 41–49. Грозы в районе наблюдаются с апреля по сентябрь. Среднее за год число дней с грозами – 13.

Трасса магистрального газопровода на рассматриваемом участке пересекает 16 постоянных водных объектов. Все пересекаемые водотоки относятся к бассейну Северного Ледовитого океана. Годовой гидрограф рек характеризуется высоким половодьем, высокими дождевыми паводками в летний период и глубокой зимней меженью. Такой характер водного режима соответствует более всего восточносибирскому гидрологическому типу. Реки района имеют смешанное питание, причем пре-

обладающим является подземный приток – 35–45 %, снеговое питание составляет 25–40 %, дождевое – 20–30 %. Под влиянием изменяющихся по территории условий циркуляции атмосферы и особенностей подстилающей поверхности указанные выше общие закономерности несколько различаются в пределах отдельных более мелких районов.

Густота речной сети данного участка относительно большая, в среднем около 0,5 км/км², по мере перехода к плато и низменностям заметно уменьшается.

Весной с наступлением положительных температур воздуха начинается таяние и разрушение ледяного покрова. Малые реки вскрываются одновременно на всем протяжении и преимущественно без ледохода. На промерзающих и на некоторых не промерзающих малых водотоках ледяной покров размывается талыми водами, накапливающимися на его поверхности, а затем текущими по льду. На средних и больших реках вскрытие происходит по участкам и сопровождается весенним ледоходом. Продолжительность вскрытия рек составляет 21–46 дней. Ледоход на реке Лене продолжается обычно 8–10 дней.

В период прохождения ледохода на крупных реках образуются мощные заторы льда, сопровождающиеся подъемами уровней воды на 2,0–10 м. На малых и средних реках они возникают очень редко, вызывают небольшие подъемы уровня воды и быстро разрушаются.

Озера не имеют широкого распространения, встречаясь в основном в поймах рек. Редко встречаются карстовые и термокарстовые озера.

В геоморфологическом отношении трасса газопровода пролегает в пределах Приленского структурно-денудационного плато, граничащего на юго-востоке с Патомским нагорьем, на севере и северо-востоке – с Лено-Вилуйской впадиной. Поверхность плато возвышается на 400–600 м над уровнем моря и полого наклонена на северо-запад (рис. 2). Максимальные абсолютные отметки наблюдаются на водоразделе Бюгюех – 554 м, а минимальные в долине р. Киенг-Юрях – 243 м. На облик рельефа большое влияние оказало тектоническое строение района и литологический состав пород. Структурные формы определили, в основном, направленность морфологических элементов, а литологические различия отложений обусловили возникновение тех или иных форм рельефа.

По преобладанию рельефообразующих экзогенных факторов на территории выделяется два основных генетических типа рельефа – эрозионно-денудационный и эрозионно-аккумулятивный. Развитие в основном положительных неотектонических структур на исследуемой территории предопределило господство денудационных процессов над аккумулятивными, мощность чехла дисперсных отложений редко превышает 3–5 м на междуречьях и увеличивается до 5–10 м в долинах рек.

Эрозионно-денудационному типу соответствуют две группы рельефа: грядово-увалистое плато на дислоцированных отложениях нижнего кембрия и волнисто-пологоувалистое плато на отложениях верхнего кембрия – ордовика.



Рис. 2. Приленское пластовое структурно-денудационное карстующееся плато [4]

Fig. 2. Sub-Lensk formation structural-rock karsting plateau

Грядово-увалистое плато на дислоцированных отложениях нижнего кембрия образовалось на антиклинальных структурах, пересекающих левые притоки р. Нюя, а также на антиклинальных структурах правобережья р. Нюя. Размеры и морфология гряд и увалов определяются типом антиклиналей, к которым они приурочены. На гребневидных структурах или структурах с овальным сводом – это узкие (0,5–2 км) гряды значительной (8–20 км) протяженности с крутыми склонами и резкими очертаниями. Поперечные ручьи и делли, рассекающие гряды, узкие, глубоко врезаемые, с V-образным поперечным профилем.

Волнисто-пологоувалистое плато на отложениях верхнего кембрия – ордовика – распространено значительно шире и характеризует рельеф водораздельных поверхностей большей части коридора трассы. Поверхности водоразделов здесь более расплывчатые, сглаженные, с постепенным переходом водоразделов в склоны речных долин (междуречье Унга-Улаха и Тас-Юрях, Бачинза и Киенг-Юрях). Направленность их различная, сами водоразделы носят характер пологосклонных увалов и холмов. Размеры отдельных холмов и увалов составляют от 5–8 до 10–12 км. На участках развития поверхностей низкого уровня (400–450 м) врезанность гидросети по глубине невелика, порядка 40–60 м, хотя густота ее довольно значительна. Изобилуют мелкие ручьи и распадки, долины их имеют корытообразный поперечный профиль.

Эрозионно-аккумулятивный рельеф. Современная гидрографическая сеть района имеет решетчатый рисунок. Долина самого крупного водного объекта, попадающего в коридор трассы газопровода – р. Нюя, заложена по простиранию крупной отрицательной структуры – Нюйской синклинали. Поперечный профиль долины р. Нюя на

участке перехода трассы асимметричный с более крутым правым берегом, пойма развита преимущественно на левом берегу. Высокая пойма отделяется от низкой уступом высотой до 6 м. Ширина долины около 350 м. Русло с песчаными косами шириной в месте перехода около 125 м.

Характер более мелких речных долин подчинен тектонической структуре их ложа и литологии отложений. При пересечении синклиналей, сложенных породами верхнего кембрия и ордовика, они имеют пологие симметричные склоны, широкие плоские днища, изобилующие меандрами, нередко заболоченную пойму (р. Туруктах, Тас-Юрях, Унга-Улахач, Иенчик). На участках пересечения антиклинальных структур долины состоят из прямолинейных отрезков и крутых врезанных меандр. Ширина долин уменьшается в несколько раз.

В тектоническом отношении проектируемая трасса газопровода Чаянда-Ленск располагается в южной части Сибирской платформы, начинается в пределах Нерского свода Непско-Ботубинской антеклизы и заканчивается в пределах Предпатомского прогиба. Территория сложена отложениями кембрия и ордовика, смятыми в протяженные гребневидные складки, простирающиеся в северо-восточном направлении, вдоль границы Байкало-Патомского покровно-складчатого сооружения. Складки осложнены многочисленными разрывами, преимущественно надвигами, падающими на юго-восток. Встречаются также поперечные крутопадающие разрывы субмеридионального простираения.

На двух участках трасса проходит по юрским отложениям, перекрывающим нижнепалеозойские отложения с угловым несогласием. Местами юрские отложения запечатывают разрывы, нарушающие кембрийско-ордовикские толщи, что свидетельствует о пассивности разрывов в посленюрское время.

По карте общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97-В трасса газопровода находится в зоне с сейсмической интенсивностью 6 баллов по шкале MSK-64.

Анализ имеющихся в свободном доступе космических снимков Landsat трассы газопровода, проведенный в 2010 г. ОАО «Фундаментпроект» [3], не выявил признаков позднечетвертичной активизации разрывов, пересекающих трассу или проходящих вблизи нее. Значительная удаленность от трассы Чаянда-Ленск наиболее сильных для района Киренских землетрясений, слабо проявленная местная сейсмичность, а также умеренная (не более 5–6 баллов) интенсивность высокомагнитудных землетрясений (Муйского 27.06.1957 и землетрясения 8.10.1974 г.), наряду с отсутствием признаков обновления разломов [5], не дали оснований для пересмотра оценок нормативной фоновой сейсмичности для трассы газопровода на участке Чаянда-Ленск, составляющих 5–6 баллов по карте ОСР-97-В и 6 баллов по карте ОСР-97-С.

Инженерно-геологические особенности территории в значительной мере определяются коренными породами, как непосредственно, так и через состав и свойства продуктов их выветривания. Ниже приводится краткая характеристика пород по формационному принципу [3].

В пределах полосы проектируемого газопровода распространены осадочные формации коренных пород, среди которых выделяются: 1) карбонатная нижнекембрийская и среднекембрийская; 2) терригенно-карбонатная средне-верхнекембрийская, нижнеордовикская и средне-верхнеордовикская; 3) терригенная нижнеюрская.

Наиболее широко распространены на территории проектируемого газопровода породы терригенно-карбонатной формации – они встречаются практически на всем ее протяжении. Карбонатная формация развита на юго-восточной половине трассы; терригенная формация развита фрагментарно в юго-восточном и северо-западном концах трассы.

Карбонатная формация (нижнекембрийская (Є1ol, Є1cr); среднекембрийская (Є2mt)): карбонатная формация имеет широкое распространение в полосе трассы и представлена известняками и доломитами. Породы трещиноваты, кавернозны и закарстованы.

Карбонатная нижнекембрийская формация представлена породами олекминской (Є1ol) и чарской свит (Є1cr), которые распространены в средней части трассы в пределах ядра крупной Среднеюрской антиклинальной зоны, также нижнекембрийские породы выходят на поверхность в междуречье Куччугуй-Утянних – Сиегенных, в долине р. Нюя и в правом борту р. Керемнике. Мощность данной формации изменяется от 100 до 250 м для олекминской свиты, и от 185 до 220 м – для чарской.

Отложения метегерской свиты (Є2mt) имеют незначительное распространение. Они принимают участие в строении крыльев антиклинальных структур района, вскрывается наиболее полно в долине р. Нюя. Мощность свиты 40–60 м.

Доломиты имеют плотность 2,80–2,91 г/см³, плотность частиц грунта 2,8–2,9 г/см³, обладают высокой прочностью на одноосное сжатие в сухом состоянии 112,6–230,7 МПа и в водонасыщенном – 107 МПа.

Известняки сохранные имеют плотность 2,61–2,73 г/см³, плотность частиц грунта 2,71–2,78 г/см³. Прочность на одноосное сжатие в сухом состоянии – 68,8 МПа и несколько меньше в водонасыщенном – 50,9 МПа.

Известняки выветрелые имеют меньшую плотность 2,56 г/см³, плотность частиц в среднем 2,74 г/см³, прочность на одноосное сжатие в сухом состоянии – 36,2 МПа и в водонасыщенном – 28,1 МПа.

Терригенно-карбонатная формация (средне-верхнекембрийская (Є2-Є3vl+il); нижнеордовикская (O1uk); и средне-верхнеордовикская

(O2-O3)): породы верхоленского и илгинского ярусов (E_2-E_3vl+il) занимают обширные территории в пределах крыльев Среднеюйской антиклинали, также их выходы наблюдаются в юго-восточной части трассы, в районе руч. Сиегенных и Тас-Юрях, в долине р. Нюя. Они представлены пестроцветными аргиллитами, алевролитами, мергелями и доломитами, мощность которых колеблется в пределах 180–210 м.

Отложения устькутской свиты (O1uk) нижнего ордовика испытывают значительные фациальные изменения. Так, в юго-восточной части разрез имеет преимущественно доломитовый состав, а севернее в нем наблюдается большое количество прослоев известняка и песчаника. Небольшие изолированные выходы фиксируются в начале трассы, вдоль р. Нюи и Станях, в междуречье Тас-Юрях и Бачинга. Мощность отложений этого яруса 160–220 м.

Терригенно-карбонатная ниже-среднеордовикская формация представлена однообразной толщей переслаивающихся между собой аргиллитов, алевролитов и мергелей, мощностью 200–250 м. Эти породы в полосе трассы встречаются достаточно редко в северной ее части – в междуречье Киенг-Юрях и Иенчик, а также отдельными островами на юго-востоке.

Алевролиты и аргиллиты имеют плотность 2,43–2,71 г/см³, плотность частиц грунта 2,65–2,83 г/см³, пористость 3,6–12,4 %. Прочность на одноосное сжатие в сухом состоянии – 35–42 МПа, при водонасыщении – 2,2–26 МПа.

Мергели имеют плотность 2,45–2,51 г/см³, плотность частиц 2,65–2,71 г/см³. Прочность на одноосное сжатие в сухом состоянии ввиду неоднородности имеет большой разброс 30,5–98,5 МПа и в водонасыщенном – 14,7–51,3 МПа.

Песчаники имеют плотность 2,41–2,61 г/см³, плотность частиц грунта 2,67–2,75 г/см³, пористость 8,5–13,4 %. Прочность на одноосное сжатие составляет в сухом состоянии 71–94 МПа, в водонасыщенном – 57–88 МПа, при промораживании – 43–73 МПа.

По инженерно-геологическим особенностям выделяются верхние горизонты карбонатных и терригенно-карбонатных толщ, представленные переслаиванием пород относительно устойчивых к выветриванию – доломитов, песчаников, плотных известняков, и пород менее прочных – аргиллитов, алевролитов, мергелей. В наибольшей степени прочностные свойства массивов горных пород снижают часто встречающиеся прослои мергелей, продукты выветривания которых имеют в основном глинисто-суглинистый состав и только доломиты и песчаники дают дресвяно-щебенистые наполнения. Мощность коры выветривания терригенно-карбонатной толщи колеблется от 1 до 15 м, на участках тектонических нарушений может возрастать до 30 м.

Терригенная формация (нижнеюрская (I1uk)): отложения укугунской свиты (I1uk) сохранились от размыва лишь на весьма ограниченных по пло-

щади участках в районе руч. Чуонда в восточной части трассы и р. Бачанга на северо-западе. Разрез представлен песками с прослоями песчаников и конгломератов, мощность этих отложений относительно невелика – не более 90 м. Продукты их выветривания имеют в основном песчаный и супесчаный состав.

Песчаники трещиноватые имеют плотность в среднем – 2,28 г/см³, прочность на одноосное сжатие 56,8 МПа в сухом состоянии и 37,1 МПа – в водонасыщенном.

Конгломераты из зоны выветривания имеют среднюю плотность 2,62–2,64 г/см³, плотность частиц грунта 2,71 г/см³, пористость 52 %, прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии – 12,4 МПа.

Инженерно-геологическая характеристика геолого-генетических комплексов четвертичных отложений. В пределах коридора трассы представлены следующие комплексы рыхлых четвертичных отложений: аллювиальные; аллювиально-делювиальные; делювиально-пролювиальные; делювиально-коллювиальные и коллювиальные; элювиальные и элювиально-делювиальные; биогенные [3].

Комплекс аллювиальных отложений (aQIV) представлен суглинками с прослоями песков, супесей и глин, подстилаемыми песками и галечниками. Мощность комплекса на разных реках составляет 1–5, 5–10 м, реже более 10 м. Донные отложения в руслах рек состоят, как правило, из песков и галечников с валунами. В периоды паводков они устойчивы к размыву.

Суглинки и супеси играют доминирующую роль в строении верхней части разреза поймы. Обычно они содержат растительные остатки, местами заторфованы. В них встречаются линзы погребенного торфа. Суглинки имеют плотность 1,27–2,04 г/см³ при природной влажности 17–35 % и плотности частиц грунта 2,60–2,75 г/см³, коэффициент пористости 0,56–0,89. В слое сезонного оттаивания грунта сильно разуплотнены и переувлажнены. В мерзлом состоянии плотность меняется от 1,1 до 1,7 г/см³ при влажности 22–34 %, льдистость за счет ледяных включений в верхней части разреза (до глубины 2–3 м) достигает 0,2–0,4 д. ед. Сетчатая, слоистая, массивная криотекстуры.

Суглинок с галькой до 25 % в мерзлом состоянии имеет плотность 1,82–1,94 г/см³ при суммарной влажности 25–31 %, пористости 41–48 % и плотности частиц грунта 2,70–2,71 г/см³.

Галечники нижней части разреза поймы имеют плотность 1,90–2,28 г/см³ при влажности до 7 %, плотность частиц грунта 2,67–2,72 г/см³, коэффициент пористости до 0,35. Галечниковый грунт в мерзлом состоянии имеет плотность 2,08–2,14 г/см³ при суммарной влажности 12–24 %, в среднем плотность частиц грунта равна 2,67 г/см³, льдистость составляет 0,11 д. ед. Криотекстура, как правило, корковая.

Комплекс аллювиально-делювиальных и аллювиально-пролювиальных отложений (ad, apQIII-IV) представлен суглинками с дресвой и щебнем, дресвяными и щебенистыми суглинками, суглинками с прослоями песков и супесей, реже глин, с включениями гальки.

Суглинки имеют плотность 1,63–2,08 г/см³ при природной влажности 20–35 %, плотность частиц грунта 2,59–2,69 г/см³, коэффициент пористости 0,7–1,08.

Супеси имеют меньшую плотность 1,08–1,94 г/см³ при природной влажности 15–50 %, плотность частиц грунта 2,41–2,79 г/см³, коэффициент пористости изменяется от 0,47 до 1.

Пески имеют плотность 1,58–1,90 г/см³ при природной влажности 10–32 %, плотность частиц грунта 2,61–2,80 г/см³, коэффициент пористости 0,85–1,54 д. ед.

Для мерзлых суглинков и супесей характерны массивная, слоистая и сетчатая криотекстуры, местами в грунтах с примесью грубообломочного материала наблюдаются базальная и корковая криотекстуры. В песках криотекстура, как правило, массивная.

Делювиально-пролювиальные отложения (dpQIII-IV) сплошным чехлом покрывают пологие склоны (крутизной 6–12°) и слагают выположенные подножья склонов крутизной менее 6°. Вещественный состав образований определяется составом пород коренной основы. Преобладающими среди них являются суглинки с включениями дресвы, щебня от 5–15 до 25 %. Консистенция грунтов меняется от полутвердой и тугопластичной (на склонах южной экспозиции) до текучей (на склонах северной экспозиции и в нижних частях склонов). Мощность отложений обычно составляет 1–5 м, увеличиваясь к основанию склонов до 5–10 м.

Глинистые грунты в составе делювиально-пролювиального комплекса имеют плотность 1,39–2,19 г/см³ при природной влажности 12–20 % и плотности частиц 2,7 г/см³, коэффициент пористости 0,45–1,13.

В мерзлом состоянии грунты слабольдистые, криотекстуры слоистая, массивная, корковая.

Комплекс делювиально-коллювиальных и коллювиальных отложений (dc, cQIII-IV) приурочен к средним (12–20°) и крутым (>20°) частям склонов. Вещественный состав образований соответствует составу пород коренной основы. Преобладают дресвяные и щебенистые суглинки с содержанием дресвы и щебня 25–50 % или щебень, глыбы, дресва с супесчано-суглинистым заполнителем. Крупнообломочная фракция представлена прочными известняками, доломитами, песчаниками, алевролитами, реже аргиллитами, продукты дезинтеграции которых составляют дисперсный заполнитель отложений. Мощность комплекса достигает 5 м.

Суглинки в составе делювиально-коллювиального и коллювиального комплекса имеют плот-

ность 1,39–2,19 г/см³ при влажности 12–20 %, плотности частиц грунта 2,71–2,9 г/см³ и коэффициенте пористости 0,45–1,13.

Супеси имеют плотность 1,45–2,19 г/см³ при природной влажности 4,3–14,6 %, коэффициенте пористости 0,45–1,13 и плотности частиц грунта 2,61–2,75 г/см³.

В мерзлом состоянии грунты слабольдистые. Преобладает корковая криотекстура.

Комплекс элювиальных и элювиально-делювиальных отложений (e, edQ, N-Q) имеет максимальное распространение в коридоре трассы. Данные отложения представляют собой продукт разрушения подстилающих скальных и полускальных карбонатных и терригенных пород. Мощность накапливающихся продуктов разрушения зависит от возраста поверхности выравнивания и скорости выветривания коренных пород, чему немало способствует и морозное растрескивание. Скорость выветривания и образования его продуктов составляет: для известняков – около 2,0 см/год; аргиллитов, алевролитов, глинистых сланцев – 1,2–2,0 см/год. Отложения представлены суглинками, реже супесями и глинами, с дресвой и щебнем, дресвяными и щебенистыми грунтами, а также песками с прослоями супесей, суглинков, глин с включениями дресвы и щебня.

Суглинки с дресвой и щебнем имеют плотность 2,1–2,5 г/см³ при влажности 6–20 % и плотности частиц грунта 2,66–2,71 г/см³. В мерзлом состоянии грунты слабольдистые, с корковой или сетчатой криотекстурами.

На водоразделах, сложенных песчаниками, с поверхностью залегают неоднородные пылеватые пески (степень неоднородности грансостава до 65 %) мощностью 1,5–2 м. Влажность песков составляет 15–20 %.

Комплекс биогенных отложений (b QIV) распространен в долинах рек. Отложения, находящиеся как правило в многолетнемерзлом состоянии представлены маломощным торфом и оторфованными суглинками. Верхний 2–3 м горизонт озерно-болотных отложений характеризуется наличием слоистых и сетчатых криогенных текстур и льдистостью за счет ледяных включений (Ii) 0,2–0,4.

Геокриологические условия проектирования весьма разнообразны. Трасса проектируемого газопровода на участке Чаянда-Ленск проложена по территории, которая в мелкомасштабном плане (Геокриологическая карта СССР, масштаба 1:2500000, 1991) относится к зоне массивно-островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Площадь развития ММП составляет от 40 до 80 % [5]. Наибольшая мощность мерзлой зоны на равнинах и плато составляет 100–250 м.

Основными факторами, влияющими на формирование температурного поля пород, являются климатические особенности территории. Значительно влияние и других геолого-географических факторов, способствующих формированию определенного температурного режима поверхности поч-

вы (рельефа, экспозиции склонов, особенности распределения снежного покрова и различных ярусов растительности). Существенно влияние состава и свойств пород слоя сезонного оттаивания-промерзания, предопределяющее, например, долю отепляющего воздействия инфильтрации на температурный режим пород, и, наоборот, долю охлаждающего влияния торфяно-моховых покровов [6–8].

В результате совместного действия всех вышеприведенных факторов наиболее суровые геокриологические условия характерны для дниц долин и нижних частей склонов. На водораздельных поверхностях мерзлотные условия, как правило, мягче. В днищах долин, помимо охлаждающего влияния зимней инверсии воздушных масс, на температурный режим пород оказывает влияние распространение заболоченных и замшелых поверхностей, что приводит к значительным потерям при испарении и слабому прогреву поверхности почвы летом за счет малой теплопроводности мхов.

На формирование температурного режима пород водораздельных поверхностей большое влияние оказывает экспозиция склонов. Различие величины инсоляции обуславливает разницу в среднегодовых температурах пород на склонах северных и южных экспозиций до 1,5–2 °С.

ОАО «Фундаментпроект» в полосе трассы газопровода при разработке карты инженерно-геокриологического районирования 1:25000 [3] были выделены следующие типы распространения и средней годовой температуры ММП:

- *прерывистое распространение ММП* с наиболее низкими средними годовыми температурами пород (–0,5...–2,5 °С) свойственно заболоченным днищам речных долин (р. Нюя, Станнах, Курунг-Юрях, Махсага, Иенчик и др.); а также крутым осыпным склонам северной экспозиции, которые встречаются преимущественно в центральной части полосы трассы проектируемого трубопровода;
- *массивно-островное распространение ММП* с фоновыми температурами –0,5...–1 °С характерно для долин малых рек и ручьев и нижних частей пологих склонов;
- *островное распространение ММП и фоновые температуры пород* –0,3...–1,0 °С свойственно водораздельным поверхностям и привершинным частям склонов;
- *наиболее высокие температуры ММП* (0...–0,5 °С) приурочены к участкам редко-островного и спорадического их распространения на водоразделах и привершинных частях пологих склонов в поле развития хорошо фильтрующих нижеюрских отложений.

Приведенные выше закономерности формирования геокриологических условий благоприятствуют распространению таликов на хорошо дренированных пологовыпуклых водоразделах и склонах, сложенных хорошо фильтрующими по-

родами. В долинах рек и ручьев развиты русловые талики, приуроченные как к зонам тектонической трещиноватости, так и к площадям развития подруслового карста в карбонатных породах.

Глубины сезонного промерзания-оттаивания в значительной мере определяются составом и свойствами грунтов. Наиболее типичные грунты слоя сезонного промерзания-оттаивания на всем протяжении трассы ? пылеватые суглинки, от легких до тяжелых, реже встречаются пески с прослоями супесей и суглинков, часто содержащие в своем составе дресву и щебень. Минимальные глубины оттаивания 0,5–1,5 м свойственны заболоченным участкам долин рек при наличии в разрезе торфа и оторфованных суглинков. Максимальные мощности сезонно-талого слоя от 2,5 до 4,5 м характерны для крутых склонов, сложенных песками, крупнообломочными или трещиноватыми скальными грунтами, в которых сказывается отепляющее влияние инфильтрации.

Глубины сезонного промерзания изменяются от 2,0–3,0 м в супесчано-суглинистых грунтах до 3,0–5,0 м в песчаных, крупнообломочных и скальных.

Четвертичные отложения всех геолого-генетических комплексов, имеющих распространение в полосе проектируемой трассы, характеризуются как слабльдистые (ГОСТ 25100–2011). Исключением составляют озерно-болотные осадки, льдистые до глубины 2–3 м (рис. 3).



Рис. 3. Льдистость четвертичных отложений [4]

Fig. 3. Ice content of quaternary deposits

Развитие экзогенных геологических процессов определяется особенностями рельефа, геологическим строением и геокриологическими условиями территории.

Наиболее широко распространенным процессом, имеющим место во всех породах, является выветривание, в котором присутствуют и физико-механическая (за счет континентальности климата и наличия глубокого сезонного промерзания), и химическая составляющие (за счет растворения карбонатов). Благодаря этому процессу большинство коренных пород территории имеют относительно мощные коры выветривания (до 15 м и более). Новейшее поднятие Приленского плато способствова-

ло активизации криогенного выветривания, о чем свидетельствуют подвергаемые денудации скалистые берега водотоков и аккумулируемые под ними мощные осыпи.

На юго-восточной части района работ, где выходят на поверхность карбонатные породы нижнего кембрия отмечаются карстовые формы рельефа. Они подразделяются на депрессии древнего заглохшего и воронки современного карста. Первые выполнены различными по возрасту и генезису терригенными отложениями, вторые – только обломками карстующихся пород. Развитию карста способствует глубокое расчленение территории и трещиноватость пород. По трещинам происходит активная циркуляция подземных вод, и как следствие – растворение и вынос относительно легко растворимых минералов. Карст на поверхности проявляется в виде воронок, полостей, понор и карстовых рвов. Основные причины, которые могут привести к активизации карста: повышение среднегодовой температуры грунтов и деградация ММП, увеличение интенсивности поверхностного стока и изменение химического состава грунтовых вод, уничтожение или уменьшение мощности четвертичных отложений, изменение гидрогеологических условий, нарушение монолитности массивов карбонатных пород.

В условиях голого карста на склонах водотоков наблюдаются специфические формы карстового рельефа, возникающие вследствие неравномерного растворения карстующихся горных пород (рис. 4).



Рис. 4. Прирусловой карст [4]

Fig. 4. Natural karst [4]

Другой характерной формой карстового рельефа являются исчезающие реки и ручьи, которые имеют прерывистый водоток, иногда в руслах фиксируются провалы в виде воронок, щелей, иногда с понорами.

Суффозионные воронки диаметром 4–6 м и глубиной от 1 до 1,5 м были отмечены при полевом обследовании в привершинных частях водоразделов, сложенных песками нижней юры. Образование суффозионных воронок объясняется выносом тонкодисперсного материала поверхностными и подземными водами. В зонах развития карстующихся пород суффозия может протекать более активно,

образуются воронки смешанного, суффозионно-карстового происхождения.

Осыпи встречаются в коридоре трассы чаще всего на склонах крутизной 12–20°, обвалы – на склонах больше 20°. Обвалам и оползанию значительных блоков скальных пород способствует их трещиноватость (рис. 5).

Глинистый состав поверхностных отложений способствует потенциальному развитию оползней и солифлюкции на пологих склонах плато в дождливые периоды. Оползни в районе, как правило, мелкие. Солифлюкционный процесс ограничивается широким развитием древесного и кустарникового яруса растительности в полосе трассы. Можно ожидать, что при сведении растительности в полосе проектируемой трассы произойдет активизация этого процесса.



Рис. 5. Обвално-осыпной склон в коридоре трассы газопровода [3]

Fig. 5. Landslide talus in the route corridor of a gas pipeline [3]

В долинах рек наблюдаются процессы эрозии. Преобладает боковая эрозия, выраженная в разрушении берегов водным потоком, включающая в себя отрыв и вынос обломков материала, сопровождающийся их переотложением (рис. 6). Наиболее интенсивно она протекает при подъеме уровня воды в весенние паводки.



Рис. 6. Подмытый берег ручья [3]

Fig. 6. Hollowed out stream bank [3]

Болота локально развиты в долинах рек и ручьев. Более широкое распространение имеют заболоченные и переувлажненные участки в долинах, у подножий пологих склонов, в седловинах (рис. 7).



Рис. 7. Заболачивание [4]

Fig. 7. Bogging [4]

Преимущественно островной характер распространения *мерзлых* пород в пределах территории, ограниченное распространение льдистых грунтов предопределили соответствующий характер развития криогенных процессов и явлений. Специфика района – преобладание одногодичных, сезонно разрушающихся криогенных образований (речные наледи, однолетние бугры пучения), возникающих не ежегодно и меняющих места своего образования в зависимости от сезонных условий промерзания. Криогенные процессы имеют локальное распространение и приурочены в основном к днищам долин. Степень пораженности площади исследований геокриологическими процессами достигает 10 %.

Сезонное пучение грунтов – самый типичный и наиболее распространенный на рассматриваемой территории мерзлотный процесс, проявляющийся в образовании кочковатого микрорельефа. В большинстве случаев кочки имеют диаметр 10–20 см, высота 20–40 см. Небольшая глубина сезонно-талого слоя и соответственно повышенные темпы промерзания талых пород препятствуют интенсивности развития пучения. Начало пучения приходится на середину–конец ноября; оно продолжается в течение всей зимы с максимальной интенсивностью с января по март. Наибольшая величина пучения наблюдается в долинах рек, полосах стока, где существуют оптимальные условия для его развития: грунтовые воды залегают на глубине меньше 3 м, и глинистые грунты значительно увлажнены. В заболоченных долинах сезонное пучение грунтов достигает 0,5 м. К участкам с минимальной величиной пучения (до 0,01–0,02 м) относятся водоразделы и склоны, сложенные породами с относительно невысокой влажностью (до 25 %) и глубоким залеганием грунтовых вод.

Многолетнее пучение наблюдается на участках торфяников и в долинах рек и водотоков с мохо-

вым покровом. Формируются небольшие по высоте (до 0,5 м) слабовыпуклые бугры пучения. Формирование бугров пучения связано с образованием и накоплением сегрегационного льда вследствие миграции влаги под влиянием температуры и влажности.

Наледи встречаются в долинах рек, они обусловлены частичным или полным промерзанием водного потока. Размеры их различны: длина от нескольких десятков метров до 1–2 км, ширина до 30–50 м, средняя мощность льда 1,0–2,0 м (рис. 9). Наледи занимают русло и пойму реки, способствуют дальнейшей разработке долины, расширяя и расчлняя русло.

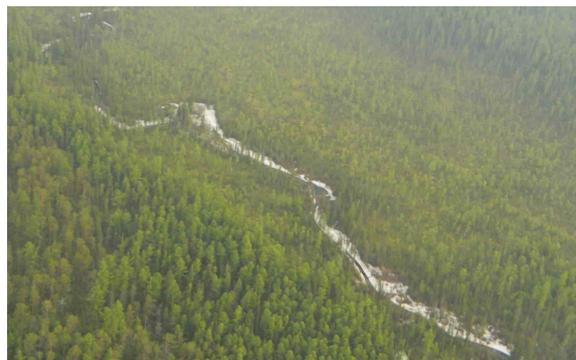


Рис. 8. Наледь в пределах Пеледуге-Нюйского междуречья [4]

Fig. 8. Ice coating within Peledue-Nyuy interfluve [4]

Неизбежные нарушения естественных природных условий при строительстве и эксплуатации газопровода могут привести к активизации экзогенных геологических процессов и возникновению опасных проявлений процессов там, где их не было в естественных условиях.

Термокарстовые образования развиваются преимущественно в сильнольдистых аллювиальных и болотных отложениях. Прогрессируют процессы термокарста в парагенезисе с пучением. Причинами развития термокарста являются повышение среднегодовой температуры пород и изменение степени обводненности участков. В настоящее время процессы термокарста развиты на плоских вершинах водораздела, сложенных элювиальными образованиями на породах терригенно-карбонатной формации, и выражены в небольших котловинах глубиной до 0,5 м. Интенсивно процессы термокарста развиваются на участках хозяйственного освоения в процессе разведки нефтегазовых месторождений. Процессы термокарста отмечены на слабодренлируемых, заболоченных участках. Связаны процессы термокарста с вытаиванием сегрегационных льдов.

Солифлюкция на площади работ приурочена к мелким долинам временных водотоков и отмечена на склонах до 10° северной и восточной экспозиций. Среди форм микрорельефа, созданных солифлюкцией, отмечаются оплывины, микротеррасы.

На дренируемых участках пологовыпуклых вершин водоразделов и на склонах долин южной и



Рис. 9. Классификация дефектов, вызываемых природными факторами

Fig. 9. Classification of defects caused by natural factors

западной экспозиций развит полигональный микрорельеф, связанный с зимним растрескиванием пород в результате их морозного иссушения. Трещины захватывают верхнюю часть глубиной до 10–25 см. Ширина их различна – от 5 до 30 см. Полигоны имеют выпуклую поверхность, размеры их от 0,3 до 1,2 м.

Учитывая описанные выше природные условия, имеющие прямое и косвенное воздействие на магистральный газопровод, нами предлагается выделить две большие группы дефектов, вызываемых инженерно-геологическими факторами и процессами (рис. 9):

- коррозионные дефекты;
- изменение проектного положения оси магистрального газопровода.

Интенсивность наружного коррозионного процесса зависит от гранулометрического состава горных пород, их структуры, удельного электриче-

ского сопротивления грунта, наличия источников блуждающих токов, наличия пар дифференциальной аэрации (ПДА). Как правило, коррозионные дефекты, вызываемые влиянием инженерно-геологических факторов, можно отнести к общей внешней коррозии. Зачастую участки с большой концентрацией коррозионных дефектов могут достигать 300–400 мм по трассе [9].

Изменение проектного положения оси магистрального газопровода, по литературным данным, может быть связано со следующими дефектами:

- Всплытие участков газопровода – к этому явлению относятся участки магистрального газопровода, потерявшие проектное положение оси в обводненном грунте с выходом на поверхность воды (рис. 10);
- Выпучины газопровода – основной причиной изменения проектного положения является морозное пучение (рис. 11);

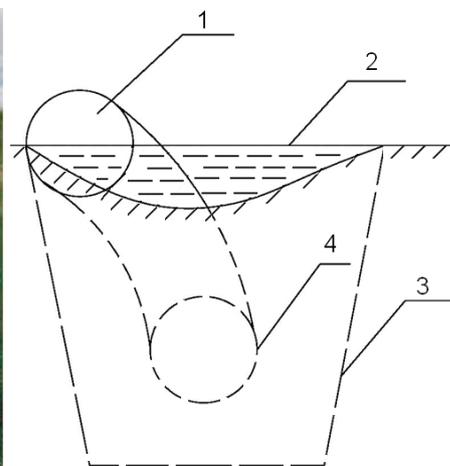


Рис. 10. Всплытие участка магистрального газопровода [10]: 1 – фактическое положение газопровода; 2 – существующая поверхность грунта; 3 – профиль строительной траншеи; 4 – положение газопровода по проекту строительства

Fig. 10. Floating up of the main pipeline [10]: 1 is the actual position of the pipeline; 2 is the existing surface of soil; 3 is the profile of the construction trench; 4 is the position of the pipeline according to the design project

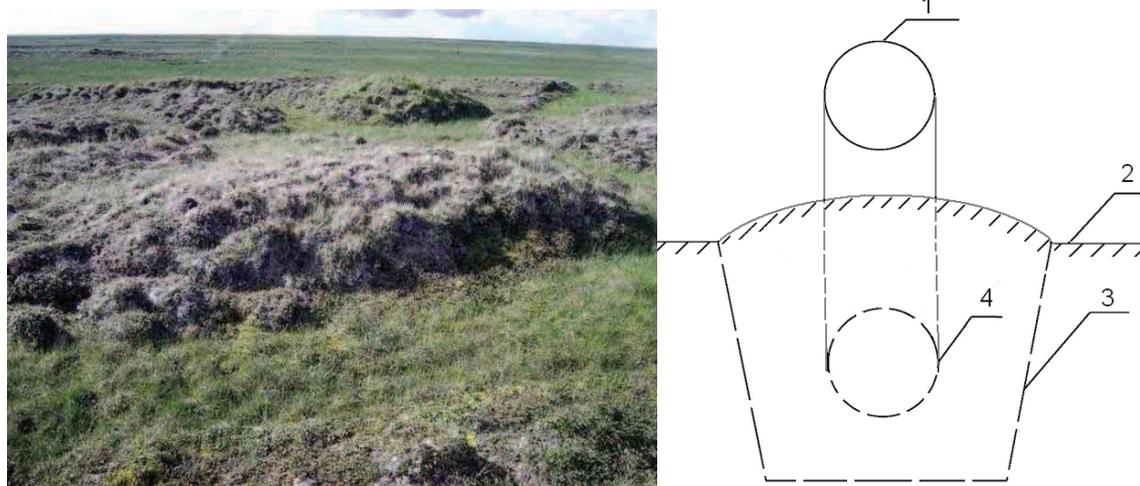


Рис. 11. Морозное пучение и выпучивание газопровода: 1 – фактическое положение газопровода; 2 – существующая поверхность грунта; 3 – профиль строительной траншеи; 4 – положение газопровода по проекту строительства

Fig. 11. Frost heave and buckling of the pipeline: 1 is the actual position of the pipeline; 2 is the existing surface of soil; 3 is the profile of the construction trench; 4 is the position of the pipeline according to the design project

- Провисы газопровода – представляют собой оголенные участки трубопровода без опоры на грунт, возникающие, к примеру, в результате карстовых явлений (рис. 12) или оттаивания вечномёрзлых грунтов.
- Просадки газопровода – участки газопровода на глинистых и лессовых грунтах, ось которых при повышении влажности грунта выше определенного значения опускается ниже проектного уровня.

В северных районах страны магистральные газопроводы на участках балластировки на значительной протяженности находятся выше проектных отметок – оголены или всплыли со сбросом

устройств-утяжелителей. Обследование трасс трубопроводов свидетельствует, что первоначально всплывают участки на углах поворота оси газопровода в плане. В период последующего паводка, при повышении уровня воды, средние участки, повторно всплывая, увлекают за собой прилегающие секции газопровода, в результате длина участка увеличивается [12]. Таким образом, в течение срока эксплуатации газопровод может всплыть на протяжении всего обводненного участка.

Морозное пучение грунта является результатом объемного расширения воды (примерно на 9%), находящейся в грунте до промерзания и дополнительно мигрирующей к границе промерза-

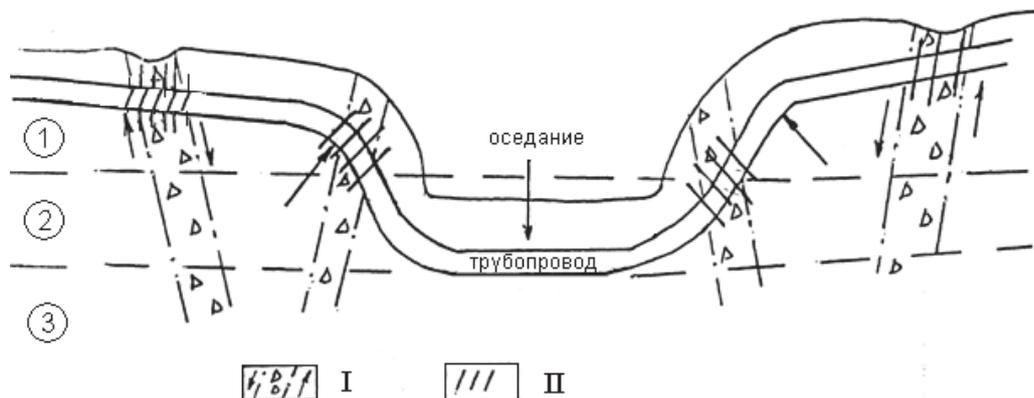


Рис. 12. Схема формирования муьды оседания земной поверхности и дополнительных напряжений в системе труба – массив горных пород: I – тектонически ослабленные зоны, определяющие блоковый характер векторных деформаций земной коры; II – дополнительные напряжения на металле трубопровода в связи с формированием муьды оседания земной поверхности с развитием карстово-суффозионных и эрозионно-тектонических форм. Гидродинамические зоны: 1 – аэрации или вертикальной нисходящей циркуляции вод; 2 – переходная; 3 – зона постоянного горизонтального стока [11]

Fig. 12. Scheme of formation of earth surface subsidence trough and additional stresses in the system a pipe – rock massif: I – tectonically weakened zones which determine block character of earth crust vector deformation; II – additional stresses on a pipeline metal due to formation of earth surface subsidence trough at the development of karst-suffosion and erosion-tectonic forms. Hydrodynamic areas: 1 – of aeration or vertical descending water circulation; 2 – transition; 3 – of constant horizontal drainage [11]

ния, в процессе перехода воды из одного агрегатного состояния в другое [13, 14]. Во время промерзания грунтов, особенно при интенсивных фазовых переходах воды (при температуре от 0 до -5°C), при некоторых условиях может происходить перераспределение воды, содержащейся в грунте. Как правило, в песках мелких и пылеватых, в пылевато-глинистых грунтах наблюдается миграция ее снизу вверх к фронту охлаждения и промерзания. Наиболее интенсивная миграция происходит в грунтах с небольшой скоростью промерзания и со значительной пылевой фракцией от 30 до 80 %. При промерзании таких грунтов происходят значительные деформации сооружений до десятков сантиметров. Необходимо учитывать, что чем ближе уровень подземных вод к границе промерзания, тем более высокой пучинистостью обладают пылевато-глинистые грунты при прочих равных условиях. Основной причиной является то, что подобные грунты имеют слабо выраженную текстуру и малое сцепление между частицами, таким образом, при промерзании лед в таких грунтах образуется внутри структурных элементов и вызывает значительные деформации. При увлажнении пылеватые грунты теряют сцепление между частицами, при промерзании в них образуется большое количество льда и ледяных линз. На объем морозного пучения грунта значительное влияние оказывает плотность их строения. Так, если грунты очень плотные, то при их промерзании наблюдается незначительное пучение, так как такие грунты имеют

небольшое количество воды и в них затруднена возможность ее миграции при промерзании. В достаточно рыхлых грунтах много пор и пустот, которые, как правило, свободны от воды, и за счет этих пустот могут гаситься деформации пучения. Грунты средней плотности с полностью заполненными водой порами при промерзании значительно увеличиваются в объеме, т. е. деформируются от морозного пучения.

Одним из самых часто встречающихся дефектов являются провисы газопровода, т. е. участки, потерявшие грунтовое основание вследствие различных процессов, таких как карстовые, эрозионные [15]. В настоящее время карстовый процесс является наиболее скрыто протекающим и трудно прогнозируемым. Карст представляет собой совокупность геологических, гидрогеологических и (или) техногенных процессов и явлений, обусловленных растворением скальных или полускальных горных пород, в результате которых происходят изменения структуры и состояния этих и вышележащих пород, образование системы взаимосвязанных полостей, каверн, трещиноватых и разуплотненных зон и связанных с ними деформаций земной поверхности и оснований сооружений. Вследствие развития данных процессов происходит горизонтальная и вертикальная деформация земной поверхности, что может стать причиной нарушения целостности и последующего разрушения магистрального трубопровода [16].

Таблица. Классификация дефектов магистральных газопроводов, вызываемых природными факторами

Table. Classification of defects of the main pipelines caused by the natural factors

| Группа дефектов Defect group | Наименование дефекта Defect name | Процесс Process | Причины и определяющие факторы Reasons and factors |
|--|--|---|---|
| Коррозионные Corrosive | Общая коррозия Total corrosion | Коррозионный Corrosive | Низкое электрическое сопротивление грунта (5–20 Ом/м)/ Low electric resistance of soil (5–20 Ohm/m) Наличие микроорганизмов/Presence of micro organisms Наличие блуждающих токов/Presence of earth currents Высокая влажность грунтов (до 25 %)/High humidity of soil (to 25 %) Наличие пар дифференциальной аэрации/Presence of pairs of differential aeration |
| Изменение проектного положения оси магистрального газопровода Change in design position of the main pipeline axis | Всплытие участков газопровода Floating up of pipeline areas | Выход трубопровода на поверхность [17] Output of a pipeline | Отсутствие балластировки/Absence of ballasting Обводненность/Water cut Слабые глинистые и заторфованные грунты/Soft clay and peaty soil |
| | Выпучины газопровода Bulge of a pipeline | Морозное пучение Frost heave | Водонасыщенность / Water saturation Содержание в грунте пылеватых частиц (от 30 до 80 %)/Silt content in soil (from 30 to 80 %) Мощность промерзающего слоя/Degree of frozen layer Средняя температура и продолжительность периода промерзания/Average temperature and duration of freezing |
| | Провисы газопровода Pipeline subsidence | Карстовые процессы, оттаивание вечномёрзлых грунтов Karst processes, permafrost soil thawing | Наличие растворимых в воде горных пород (карбонатные, сульфатные и пр.)/Presence of rock soluble in water (carbonate, sulfate etc.) Трещиноватость массива пород/Fracturing of rock massif Поверхностный сток и инфильтрация атмосферных осадков/Surface water drainage and infiltration of precipitation Изменение режима и уровня подземных вод/Change in mode and level of underground waters |
| | Просадки газопровода Pipeline sag | Просадка грунта Soil subsidence | Повышение влажности/Increase of humidity Наличие глинистых и лессовых пород/Presence of clay rocks and loess Засоленные грунты/Saline soil |

Учитывая все вышесказанное, можно представить следующую общую классификацию дефектов магистральных газопроводов, вызываемых природными факторами (таблица).

Представленная классификация дефектов в достаточной мере отражает разнообразие природных факторов, влияющих на возникновение дефектов магистральных газопроводных систем.

Заключение

В результате проведенных на данном этапе исследований можно сделать следующие выводы:

- трассу газопровода планируется проложить по полого-увалистому плато, пересекаемому р. Нью и ее притоками;
- территория проектируемой трассы характеризуется неглубоким залеганием коренных пород карбонатной и терригенно-карбонатной формаций палеозоя и терригенной формации нижней юры; породы коренной основы сильно трещиноваты и нестойки к выветриванию, особенно в зонах тектонических нарушений, что определяет высокую водопроницаемость и снижение несущей способности грунтов оснований. В карбонатных породах развит карст;
- четвертичные породы представлены образованиями в основном элювиального, склонового и аллювиального генезиса; их мощность изменяется от 0 до 10 м;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гостева А.В., Глебова Е.В., Черноплёков А.Н. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на магистральных газопроводах на основе результатов анализа риска // Нефть, газ и бизнес. – 2009. – № 9. – С. 68–70.
2. Аристов М. Воздействие геологических и других природных процессов на магистральные газопроводы. Результаты исследований с применением мультиспектральных аэрокосмических съемок // Электронный научный журнал «Геопрофиль». – 2008, ноябрь–декабрь. – № 3. – С. 44–50. URL: <http://internetgeo.ru/uploads/journals/geoprofile0308/pipeline.pdf> (дата обращения: 27.01.2015).
3. Технический отчет. Выполнение комплексных инженерных изысканий по объекту «Магистральный газопровод «Сила Сибири»». Участок Чаянда–Ленск. В 5 т. Т. 3 – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2012. – 43 с.
4. Фурсова Е.В., Шестаков Д.И. Отчет по производственной практике по выполнению комплексных инженерных изысканий площадных объектов сбора газа на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении. – Томск: НИ ТПУ, 2011. – 92 с.
5. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. – М.: Светоч Плюс, 2010. – 304 с.
6. Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2500000. – М., 1991.
7. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 414 с.
8. Инженерная геология СССР. Т. 3. Восточная Сибирь / под ред. Г.А. Голодковской. – М.: Изд-во Моск. ун-та. 1977. – 657 с.
9. Применение геоинформационных систем для оценки влияния природных факторов на техническое состояние магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» / А.Н. Распутин, В.А. Желобецкий, С.Н. Куимов, К.В. Постаутов // Газовая промышленность. – 2009. – № 11. – С. 81–83.
- трасса проектируемого газопровода проложена в зоне массивно-островного распространения многолетнемерзлых пород со среднегодовой температурой от 0 до минус 2,5 °С. Наиболее суровые геокриологические условия характерны для днщ долин и нижних частей склонов. Породы в целом являются слабльдистыми. Исключение составляют заболоченные и заторфованные участки долин, льдистые до глубины 2 м;
- из современных экзогенных геологических процессов на территории распространены: выветривание, карст (поверхностный и подземный) [18], суффозия, речная эрозия, заболачивание, обвалы и осыпи. Криогенные процессы приурочены к днщам долин и представлены солифлюкцией, термокарстом [19, 20], сезонным пучением грунтов и наледообразованием;
- из опасных процессов эндогенного характера в пределах района работ возможны землетрясения. Согласно карте общего сейсмического районирования сейсмичность района изысканий составляет: по картам ОСР-97-А и В (10 и 5 % вероятность превышения) – 6 баллов; по карте ОСР-97-С (1 % вероятность превышения) – 7 баллов.

Наиболее неблагоприятными физико-геологическими процессами для строительства газопровода в пределах изученной территории являются процессы мерзлотного характера и карст.

- gement / Ph.E. van Beynen (ed). – Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2011. – P. 75–102.
19. Панчуков Н.П. Проблемы освоения месторождений нерудных полезных ископаемых открытым способом на территориях распространения сульфатного карста // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 3. – С. 131–142.
20. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / под ред. Е.М. Мельникова, С.Е. Гречищева. – М.: ГЕОС, 2002. – 402 с.

Поступила 28.01.2015 г.

UDC 624.131

NATURAL FEATURES OF CONSTRUCTING THE MAIN GAS PIPELINE «THE POWER OF SIBERIA» ON A SITE CHAYANDINSKOYE OIL AND GAS FIELD – LENSK

Lyudmila A. Strokova,

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

Alyona V. Ermolaeva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: alyona7@inbox.ru

The relevance of the research is related to the growth of breakdown susceptibility on the linear part of the main gas pipelines caused by the influence of natural and technogenic factors in regions of distribution of eternal frozen grounds, a cross-country terrain, etc.

The main aims of the study are to describe the natural zonal and regional geological factors of engineering-geological conditions of the territory of the projected gas pipeline «Force of Siberia» on the section Chayanda–Lensk, to determine classification signs of defects of the main gas pipelines caused by engineering-geological factors and widespread in the region of works; to detect the main dangerous engineering-geological processes, characteristic for the region of works and having direct impact on the system the pipeline–soil.

The methods used in the study: the analysis of materials of engineering-geological researches for designing the objects of the linear infrastructure of the «Force of Siberia» main gas pipeline, executed by the Federal State Unitary Enterprise «Vostsib of AGP», JSC «Ingeokom», JSC «Promneftegazproyekt», JSC «Fundamentproyekt», JSC «NPF DIEM»; gathering and processing the materials of last years, statistical data on breakdown susceptibility of the main gas pipelines of JSC «Gazprom» on the linear part owing to dangerous geological processes, natural and other technogenic factors.

The results. The authors have considered the climatic, geomorphological features of the place of design of a gas pipeline «Force of Siberia». The paper introduces the description of both engineering-geological formations of parent rocks, and the characteristic of geological and genetic complexes of quaternary deposits. The authors estimated the impact of geocryologic conditions of construction and exogenic processes on the designed object and proposed the classification of defects of the main gas pipelines caused by dangerous geological, engineering-geological processes. The key reasons and factors of the processes having direct impact on operational reliability of the pipelines were defined according to the proposed classification.

Key words:

Main gas pipelines, defects, rocks, dangerous geological processes, karst, bogging.

REFERENCES

- Gosteva A.V., Glebova E.V., Chernoplekov A.N. Prognostirovanie chrezvychaynykh situatsiy na magistralnykh gazoprovodakh na osnove rezultatov analiza riska [Forecasting the emergency situations on gas pipelines on the basis of the results of risk analysis]. *Neft, gaz i biznes*, 2009, no. 9, pp. 68–70.
- Aristov M. Vozdeystvie geologicheskikh i drugikh prirodnykh protsessov na magistralnye gazoprovody. Rezultaty issledovaniya s primeneniem multispektralnykh aerokosmicheskikh semok [The impact of geological and other natural processes on gas pipelines. The results of research using multispectral aerospace imagery]. *Geoprofil*, 2008, no. 3, pp. 44–50. Available at: <http://internet-geo.ru/uploads/journals/geoprofile0308/pipeline.pdf> (accessed 27 January 2015).
- Tekhnicheskyy otchet. Vypolnenie kompleksnykh inzhenernykh izyskany po obektu «Magistralny gazoprovod «Sila Sibiri»». Uchashtok Chayanda–Lensk* [Complex engineering surveys for the project «Pipeline «Power of Siberia»». Section: Chayanda–Lensk]. Saratov, VNIPIgazdobycha Publ., 2012. Vol. 3, 43 p.
- Fursova E.V., Shestakov D.I. *Otchet po proizvodstvennoy praktike po vypolneniyu kompleksnykh inzhenernykh izyskany ploshchadnykh obektov sbora gaza na Chayandinskom NGKM* [Report on practical training in performance of complex engineering survey of area features for gas collection from the Chayandinskoye oil and gas condensate field]. Tomsk, NI TPU, 2011. 92 p.
- Aleshin A.S. *Seismicheskoe mikrorayonirovanie osobo otvetstvennykh obektov* [Seismic microzoning of especially important objects]. Moscow, Svetoch Plyus Publ., 2010. 304 p.
- Geokriologicheskaya karta SSSR, masshtab 1:2500000* [Geocryological map of the USSR]. Moscow, 1991.
- Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Middle Siberia]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, Nedra Publ., 1989. 414 p.
- Inzhenernaya geologiya SSSR. Tom 3. Vostochnaya Sibir* [Engineering Geology of the USSR. Vol. 3. Eastern Siberia]. Ed. by G.A. Golodovskaya. Moscow, Moscow University Press, 1977. 657 p.

9. Rasputin A.N., Zhelobetsky V.A., Kuimov S.N., Postautov K.V. Primenenie geoinformatsionnykh sistem dlya otsenki vliyaniya prirodnykh faktorov na tekhnicheskoe sostoyanie magistralnykh gazoprovodov OOO «Gazprom transgaz Ekaterinburg» [Application of geographic information systems to assess the impact of natural factors on technical state of gas pipelines LLC «Gazprom transgaz Ekaterinburg»]. *Gazovaya promyshlennost*, 2009, no. 11, pp. 81–83.
10. Kazakov N.A., Gensirovsky Yu.V. Ekzogennyye geodinamicheskie i ruslovye protsessy v nizkogore o. Sakhalin kak faktory riska dlya neftegazoprovodov «Sakhalin-2» [Exogenous geodynamic and river channel processes in the low Sakhalin island as risk factors for pipeline «Sakhalin-2»]. *GEOEKOLOGIYA. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya – ENVIRONMENTAL GEOSCIENCE: Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*, 2008, no. 6, pp. 483–496.
11. Gaev A.Ya., Kilin Yu.A., Alferov I.N., Alferova N.S. Primery modelirovaniya karstovykh protsessov [Examples of modeling karst processes]. *Karstovyye sistemy severa v menyayushcheysya srede* [Proc. Symp. Northern karst systems in our changing environment]. Pinega-Golubino, Russia, 5–10 September 2011. pp. 34–37.
12. Klimchuk A.B. Sistematizatsiya struktury vodoobmena kak sistemooobrazuyushchee svoystvo karsta [Systematization patterns of water exchange as a core feature of karst]. *Geologicheskyy zhurnal*, 2011, no. 1, pp. 85–110.
13. White W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, 2002, vol. 65, pp. 85–105.
14. Worthington S.R.H., Ford D.C. Self-organized permeability in carbonate aquifers. *Ground Water*, 2009, vol. 43 (3), pp. 326–336.
15. Zaderigolova M.M. Snizhenie tekhnogennikh riskov na podvodnykh perekhodakh magistralnykh gazoprovodov s opasnymi geodinamicheskimi protsessami [The risk of reduction for underwater crossings of trunk pipelines of dangerous geodynamic processes]. *Territoriya neftegaz*, 2013, no. 9, pp. 18–22.
16. Krashennnikov V.S., Khomenko V.P. Izuchenie pokryvayushchey tolshchi kak odin iz vazhneyshikh komponentov inzhenernykh izyskaniy v rayonakh pokrytogo karsta [The study of overlying strata as one of the most important components of engineering research in the areas of covered karst]. *Vestnik MGSU*, 2011. no. 5. pp. 113–119.
17. Bayasan R.M., Golubin S.I., Pustovoit G.P., Proshina T.V., Korotchenko A.G. Optimization of engineering solutions for thermal stabilization of saline permafrost soils at bases of structures by means of two-phase heat pipes. *Proc. VII Minsk International Seminar. Heat pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources*. Minsk, Belarus, 2008. pp. 139–143.
18. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in collapse risk Assessment of building on Covered Landscapes in Russia. *Karst management*. Ed. by Ph.E. van Beynen. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2011. pp. 75–102.
19. Panchukov N.P. Problemy osvoeniya mestorozhdeniy nerudnykh poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom na territoriyakh rasprostraneniya sulfatnogo karsta [Problems of developing deposits of non-metallic minerals in an open way on the territories of sulphate karst distribution]. *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten*, 2011. no. 3, pp. 131–142.
20. *Permafrost and development of oil and gas areas*. Ed. by E.M. Melnikov, S.E. Grechishev. Moscow, GEOS, 2002. 402 p.

Received: 28 January 2015.

УДК 553.982

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ НЕФТЕЙ

Яценко Ирина Германовна,

канд. геол.-минерал. наук, заведующая лабораторией
«Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефтей»
Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: sric@ipc.tsc.ru

Полищук Юрий Михайлович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. Института химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск,
пр. Академический, 4. E-mail: yuri@ipc.tsc.ru

Актуальность работы определяется необходимостью изучения качественных показателей трудноизвлекаемых нефтей, рассматриваемых как основная база прироста нефтедобычи в среднесрочной перспективе ввиду истощения запасов легкодоступных нефтей. Недостаточная изученность качественных особенностей таких нефтей затрудняет оценку перспектив и определение направлений развития отечественного нефтегазодобывающего комплекса.

Цель работы: проведение анализа качественных показателей различных видов трудноизвлекаемых нефтей с использованием предложенного авторами индекса качества нефтей, включая изучение особенностей физико-химических свойств и условий залегания разных видов нефтей, относящихся к различным классам качества (низкого, среднего и высокого).

Методы исследования: классификация нефтей по комплексному показателю (индексу) качества и по совокупности измеряемых физико-химических характеристик и условий залегания и исследование методами статистического анализа особенностей различных классов трудноизвлекаемых нефтей, выделенных по результатам классификации.

Результаты работы. Предложен индекс качества трудноизвлекаемых нефтей, рассматриваемых как основная база прироста нефтедобычи в среднесрочной перспективе ввиду истощения запасов легкодоступных нефтей. Рассмотрены классификации трудноизвлекаемых нефтей по индексу качества и физико-химическим показателям нефтей. Дана краткая характеристика разных видов трудноизвлекаемых нефтей, относящихся к разным классам качества. На основе анализа 19000 образцов нефтей изучены особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей низкого, среднего и высокого качества. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих методов и технологий нефтедобычи, транспортировки и переработки нефтей с аномальными физико-химическими свойствами либо нефтей с осложненными условиями залегания.

Ключевые слова:

Трудноизвлекаемые нефти, классификация нефтей, нефтегазоносный бассейн, физико-химические свойства нефтей, индекс качества нефти, классы качества нефти.

Введение

Известно, что наибольшая часть современных энергетических потребностей человечества обеспечивается нефтью и газом. Рост добычи нефти в мире привел к истощению запасов наиболее качественных и легкодоступных нефтей, в связи с чем основную базу прироста нефтедобычи в среднесрочной перспективе как в нашей стране, так и других добывающих странах будут составлять трудноизвлекаемые нефти.

Согласно [1–16], к трудноизвлекаемым относятся запасы нефтей, представленные малоподвижной нефтью (например, с высокими вязкостью или плотностью и высоким содержанием твердых парафинов), нефтей с высокой (более 500 м³/т) или низкой (менее 200 м³/т) газонасыщенностью либо при наличии в растворенном и/или свободном газе агрессивных компонентов (сероводород, углекислота) в количествах, требующих применения специального оборудования при бурении скважин и добыче нефти. К трудноизвлекаемым также относятся нефти с осложненными условиями залегания (заклученные в геологически сложнопостроенных пластах и залежах, в во-

донефтяных и газонефтяных зонах, в слабопроницаемых и низкопористых коллекторах, с аномально высокой и низкой пластовой температурой и др.), а также нефти, размещенные на территории многолетней мерзлоты.

Рост в последние годы объемов добычи труднодоступных нефтей создает различные технологические проблемы при нефтедобыче, обусловленные как аномальностью их физико-химических характеристик, так и осложненными условиями залегания. Как известно, наиболее перспективные нефтегазоносные бассейны России полностью или частично располагаются на территории криолитозоны [17–21], где обустройство месторождений, добыча и транспортировка сопровождаются значительным ростом затрат и необходимостью использования новых технологий. Заметим, что в литературе криолитозона обычно подразделяется на островную, прерывистую и сплошную, последние две из которых в нашей работе для удобства представления результатов анализа, согласно [22], объединены в единую прерывисто-сплошную криолитозону. Аномальность физико-химических свойств таких нефтей создает технологические

проблемы их переработки и транспортировки. Включение в разработку трудноизвлекаемых запасов нефтей с высокой плотностью и вязкостью, с высоким содержанием серы, парафинов и смол не только ухудшает химико-технологические параметры нефтяного сырья, но и усиливает негативное влияние на окружающую среду, увеличивая экологические издержки территорий.

Однако качественные показатели и особенности химического состава и физических свойств таких нефтей с учетом условий их залегания и географического размещения изучены достаточно слабо, что затрудняет решение технологических проблем добычи, переработки и транспортировки трудноизвлекаемых нефтей (ТИН). С другой стороны, недостаточная изученность качественных особенностей таких нефтей затрудняет оценку перспектив и определение направлений развития отечественного нефтегазодобывающего комплекса. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилось проведение анализа качественных показателей различных видов ТИН, включая изучение особенностей физико-химических свойств и условий их залегания.

Общая характеристика и классификация видов трудноизвлекаемых нефтей

Перечень основных видов трудноизвлекаемых нефтей, составленный в [8] на основе обобщения критериев отнесения нефтей к трудноизвлекаемым, которые обсуждались в большом числе научных публикаций [1–7, 9–11], представлен в табл. 1. В соответствии с этим перечнем видов трудноизвлекаемых нефтей можно рассматривать две основные группы таких нефтей. Первую группу составляют виды нефтей с аномальными физико-химическими свойствами (высокая вязкость и плотность, высокое содержание серы, парафинов, смол и асфальтенов, высокая или низкая газонасыщенность и др.), ко второй группе относятся различные виды нефтей с осложненными условиями залегания.

Характеристика информационного описания разных видов ТИН, данная в табл. 1, основана на использовании информации из базы данных (БД) по физико-химическим свойствам нефтей мира, созданной в Институте химии нефти СО РАН. База данных зарегистрирована в Государственном реестре баз данных (Регистрационное свидетельство

Таблица 1. Виды трудноизвлекаемых нефтей и характеристика их информационного описания в БД

Table 1. Types of hard-to-recover oils and characteristic of their informational description in DB

| | Виды трудноизвлекаемых нефтей Types of hard-to-recover oils | Объем выборки из БД DB sample size | Количество бассейнов Amount of basins | Количество месторождений Number of fields |
|--|--|--|---|---|
| Нефти с аномальными свойствами Oils with anomalous properties | Тяжелая (плотность более 0,88 г/см ³) Heavy (density is higher than 0,88 g/cm ³) | 5378 | 126 | 1792 |
| | Вязкая (вязкость более 35 мм ² /с при 20 °С) Viscous (viscosity is higher than 35 mm ² /s at 20 °C) | 2622 | 68 | 915 |
| | Сернистая (содержание серы более 3 %) Sulfurous (Sulphur content is higher than 3 %) | 919 | 40 | 377 |
| | Смолистая (содержание смол более 13 %) Tarry (resin content is more than 13 %) | 2157 | 54 | 730 |
| | Парафинистая (содержание парафинов более 6 %) Paraffin (paraffin content is higher than 6 %) | 2477 | 60 | 844 |
| | С высокой газонасыщенностью (более 500 м ³ /т) With high gas saturation (more than 500 m ³ /t) | 78 | 24 | 51 |
| | С низкой газонасыщенностью (менее 200 м ³ /т) With low gas saturation (less than 200 m ³ /t) | 2875 | 67 | 1141 |
| | С высоким содержанием сероводорода (более 5 %) With high content of hydrogen sulfide (more than 5 %) | 125 | 19 | 65 |
| Нефти в сложных условиях залегания Oils in complex storage conditions | В слабопроницаемых коллекторах (менее 0,05 мкм ²) In low permeable reservoirs (less than 0,05 μm ²) | 618 | 37 | 419 |
| | В коллекторах с низкой пористостью (менее 8 %) In reservoirs with low porosity (less than 8 %) | 98 | 16 | 70 |
| | Большие глубины залегания (более 4500 км) Deep occurrence (more than 4500 km) | 438 | 29 | 213 |
| | В прерывисто-сплошной криолитозоне In intermittent-continuous cryolithozone | 2467 | 7 | 680 |
| | В островной криолитозоне In insular cryolithozone | 3126 | 3 | 932 |
| | Высокая пластовая температура (выше 100 °С) High reservoir temperature (higher than 100 °C) | 869 | 47 | 458 |
| | Низкая пластовая температура (ниже 20 °С) Low reservoir temperature (lower than 20 °C) | 334 | 37 | 186 |

№ 6624) и в Роспатенте (свидетельство № 2001620067, г. Москва, 16.05.2001 г.) [12, 13]. В базе данных в настоящее время представлено около 24000 образцов нефтей, которые относятся к 191 нефтегазонасному бассейну мира и 5821 нефтяным месторождениям, расположенным на территории 92 стран.

Для проведения исследований в настоящей работе важно, что общее число образцов нефтей в БД, относящихся к различным видам ТИН, доходит до 19000. Распределение информации в БД по видам ТИН дано в табл. 1, где также указано количество нефтегазонасных бассейнов (НГБ) и месторождений с указанными нефтями. Из указанной таблицы видно, что изучаемые в настоящей работе ТИН с аномальными свойствами представлены 16631 образцом, ТИН с осложненными условиями залегания – 2357 образцами. Как видно в табл. 3, объемы выборочных совокупностей данных из БД для каждого из рассмотренных видов ТИН достаточно представительны, что позволяет получать обоснованные результаты статистического анализа.

Методические вопросы проведения анализа

Рассмотрим методические вопросы проведения анализа качественных показателей трудноизвлекаемых нефтей. Как указано в Дополнениях 1989 г. к ГОСТ 9965 «Нефть для нефтеперерабатывающих предприятий. Технические условия», основными показателями, характеризующими потребительские свойства нефти и определяющими ее цену, являются плотность и содержание серы. Позже в ТУ 39–1623–93 «Нефть российская, поставляемая для экспорта» в качестве наиболее влияющих на потребительские свойства нефти указываются следующие физико-химические характеристики нефти: плотность, выход фракций при температурах кипения до 200, 300 и 350 °С, массовая доля серы и концентрация хлористых солей.

Плотность нефти характеризует количество содержащихся в ней асфальтосмолистых веществ, способствующих образованию стойких водонефтяных эмульсий. Выявляются и другие негативные последствия при переработке тяжелых смолистых нефтей, в частности увеличение затрат при транспортировке и переработке такой нефти. Повышенное содержание серы в нефти приводит к интенсивной коррозии аппаратуры и «отравлению» катализаторов, к необходимости зашлакачивания продуктов переработки и гидроочистки бензиновых фракций. Увеличение содержания светлых фракций в нефти, приводящее к снижению затрат при производстве топлив, повышает качество нефти.

В нашей работе [16] предложен комплексный показатель качества нефти, учитывающий перечисленные выше физико-химические параметры нефти. В [16] также дана методика определения этого комплексного показателя качества, называемого далее для сокращения индексом качества K , рассчитываемого по формуле:

$$K=0,04S+0,00054C+1,74\rho-0,0087\Phi_{200}-0,0056\Phi_{300}-0,0049\Phi_{350}, \quad (1)$$

где S – содержание общей серы в нефти (%); C – концентрация хлористых солей (мг/л); ρ – плотность нефти (г/см³); Φ_{200} , Φ_{300} и Φ_{350} – содержание (%) светлых фракций при температуре кипения до 200, 300 и 350 °С соответственно.

Согласно [16], индекс качества нефти K , рассчитываемый по формуле (1), является безразмерной положительной величиной ($K \geq 0$), увеличение значений которой соответствует снижению качества нефти, а уменьшение – повышению качества нефти. Поэтому индекс качества нефти можно использовать для сравнения разных видов ТИН по их качеству. С этой целью далее будем использовать классификацию нефтей по качеству, разработанную в [16]:

- Класс 1 – нефть высокого качества, при $K \leq 0,75$,
- Класс 2 – нефть среднего качества, при $0,75 < K \leq 1,10$,
- Класс 3 – нефть низкого качества, при $K > 1,10$.

Рассчитанные по формуле (1) значения индекса качества для различных видов ТИН на основе информации из БД приведены в табл. 2, в которой в столбце «Значение индекса качества K » приведены средние значения индекса качества по выборкам для каждого вида трудноизвлекаемых нефтей. Здесь для удобства сравнения различных видов трудноизвлекаемых нефтей по индексу качества на основе классификации нефтей по качеству в виде (2) приведено распределение ТИН по классам с разными качественными показателями. Так, согласно данным табл. 2, видно, что наиболее высоким качеством отличаются трудноизвлекаемые нефти с высокой газонасыщенностью, а наиболее низким – тяжелые и сернистые нефти. Этот вывод означает, что нефти с высокой газонасыщенностью всегда будут высокого качества, а нефти тяжелые и сернистые всегда будут относиться к классу нефтей низкого качества.

Введенный выше в рассмотрение индекс качества удобен для ранжирования по качеству разных видов трудноизвлекаемых нефтей, но он не позволяет выявлять особенности различных видов ТИН по их физико-химическим свойствам. Анализ особенностей химического состава и физических свойств разных видов трудноизвлекаемых нефтей может быть проведен с использованием классификации нефтей по физико-химическим характеристикам. Ранее нами были разработаны общая классификация нефти по ограниченному перечню основных физико-химических свойств [8] и ряд частных классификаций нефтей, например, по плотности [23], содержанию смол [24], для отдельного анализа особенностей тяжелых, смолистых и др. нефтей.

Таблица 2. Значения индекса качества различных видов трудноизвлекаемых нефтей

Table 2. Values of quality index for different kinds of hard-to-recover oils

| Виды трудноизвлекаемых нефтей Kinds of hard-to-recover oils | Значение индекса качества К Value of quality index K |
|---|---|
| Класс 1. Нефти высокого качества ($K \leq 0,75$) Class 1. Oils of high quality ($K \leq 0,75$) | |
| С высокой газонасыщенностью With high gas saturation | 0,45 |
| С высоким содержанием сернистого газа With high content of sulfur gas | 0,66 |
| С высокой пластовой температурой With high reservoir temperature | 0,68 |
| В прерывисто-сплошной криолитозоне In intermittent-continuous cryolithozone | 0,71 |
| С большой глубиной залегания With deep occurrence | 0,71 |
| Класс 2. Нефти среднего качества ($0,75 < K \leq 1,10$) Class 2. Oils of medium quality ($0,75 < K \leq 1,10$) | |
| В островной криолитозоне In insular cryolithozone | 0,79 |
| В слабопроницаемых коллекторах In low permeable reservoir | 0,87 |
| Парафинистые Paraffin | 0,89 |
| С низкой газонасыщенностью With low gas saturation | 0,93 |
| В коллекторах с низкой пористостью In reservoirs with low porosity | 1,02 |
| С низкой пластовой температурой With low reservoir temperature | 1,08 |
| Класс 3. Нефти низкого качества ($K > 1,10$) Class 3. Oils of low quality ($K > 1,10$) | |
| Смолистые/ Tarry | 1,23 |
| Вязкие/Viscous | 1,25 |
| Тяжелые/Heavy | 1,30 |
| Сернистые/ Sulfurous | 1,41 |

Однако указанные классификации не учитывают всех свойств нефти, характерных для трудноизвлекаемых нефтей, в частности газосодержание и содержание фракции н.к. 350 °С, что потребовало включения в классификацию дополнительного перечня показателей классифицируемых нефтей. Кроме того, за время, прошедшее после создания упомянутых классификаций [8, 23, 24], база данных пополнилась несколькими тысячами элементов информации об образцах трудноизвлекаемых нефтей, что создало возможности для уточнения границ классификационных интервалов. В связи с вышеизложенным для проведения анализа в настоящей работе возникла необходимость создания обновленной классификации нефтей на основе дополнения и обобщения разработанных ранее классификаций.

Такая усовершенствованная классификация нефтей по физическим свойствам и по химическому составу представлена ниже в виде двух таблиц (табл. 3, 4). Методологической основой составле-

ния табл. 3, 4 является статистический анализ выборочных совокупностей данных из базы данных, сформированных для каждого показателя нефтей. Разработка классификации нефтей по физико-химическим свойствам предполагала определение пределов классификационных интервалов, для чего проводился анализ выборочных совокупностей данных об анализируемых характеристиках нефтей. Диапазон изменения значений анализируемого параметра разделяется на интервалы низких, средних, высоких и (в ряде случаев) очень высоких значений параметра. Составленная таким образом классификация нефтей по физическим свойствам (табл. 3) и по химическому составу (табл. 4) учитывает основные физико-химические показатели, характерные для различных видов трудноизвлекаемых нефтей, что делает ее пригодной для проведения исследований особенностей химического состава и физических свойств ТИН. Эта классификация далее будет использоваться для проведения исследований в настоящей работе.

Таблица 3. Классификация нефтей по плотности и вязкости

Table 3. Oil classification by density and viscosity

| Показатель Index | Класс нефти/Oil class | Пределы изменения классификационных интервалов Change range of classification intervals | |
|--|--|--|------------------------|
| Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ | очень легкая/very light | (less than) менее 0,80 | |
| | легкая/light | 0,80–0,84 | |
| | со средней плотностью with medium density | 0,84–0,88 | |
| | тяжелая heavy | с повышенной плотностью with high density | 0,88–0,92 |
| | | сверхтяжелая super heavy | 0,92–0,96 |
| | | битуминозная bituminous | (more than) более 0,96 |
| Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °С, mm ² /s | маловязкая/low-viscous | (less than) менее 10 | |
| | средневязкая/mid-viscous | 10–35 | |
| | вязкая viscous | с повышенной вязкостью with high viscosity | 35–100 |
| | | высоковязкая high-viscous | 100–500 |
| | | сверхвязкая ultraviscous | (more than) более 500 |

Анализ планетарного размещения трудноизвлекаемых нефтей различного качества

Рассмотренная выше классификация трудноизвлекаемых нефтей по качеству в виде (2) позволяет разработать карто-схемы пространственного размещения каждого вида ТИН на континентах или в целом на земном шаре. Для иллюстрации на рис. 1–3 показано распределение некоторых видов ТИН с разными классами качества. Так, на

Таблица 4. Классификация нефтей по химическому составу

Table 4. Oil classification by chemical composition

| Показатель/Index Содержание (мас. %) Content of (wt. %) | Класс нефти/Oil class | Пределы изменения классификационных интервалов Change range of classification intervals | |
|---|--|--|----------------------|
| серы/sulfur | малосернистая/low sulfur | (less than) менее 0,5 | |
| | среднесернистая/ medium sulfur | 0,5–1 | |
| | сернистая/ sulfur | 1–3 | |
| | высокосернистая/high sulfur | (more than) более 3 | |
| смола/resins | малосмолистая/low resin | (less than) менее 8 | |
| | среднесмолистая/medium resin | 8–13 | |
| | смолистая resinous | умеренно смолистая/medium resinous | 13–20 |
| | | высокосмолистая/high resinous | 20–30 |
| | | сверхвысокосмолистая/ultrahigh resinous | (more than) более 30 |
| асфальтенов asphaltenes | малоасфальтеновая/low-asphalten | (less than) менее 3 | |
| | среднеасфальтеновая/medium-asphalten | 3 –10 | |
| | высокоасфальтеновая/high-asphalten | (more than) более 10 | |
| парафинов paraffin | малопарафинистая/low-paraffin | (less than) менее 1,5 | |
| | среднепарафинистая/medium-paraffin | 1,5–6 | |
| | парафинистая paraffin | умеренно парафинистая/medium paraffin | 6–10 |
| | | высокопарафинистая/high paraffin | 10–20 |
| | | сверхвысокопарафинистая/ultrahigh paraffin | (more than) более 20 |
| фракции до 200 °С 200 °C up to fraction | с низким содержанием фракции/with low content of fraction | (less than) менее 20 | |
| | со средним содержанием фракции/with medium content of fraction | 20 –30 | |
| | с высоким содержанием фракции/with high content of fraction | (more than) более 30 | |
| фракции до 300 °С 300 °C up to fraction | с низким содержанием фракции/with low content of fraction | (less than) менее 25 | |
| | со средним содержанием фракции/with medium content of fraction | 25–50 | |
| | с высоким содержанием фракции/with high content of fraction | 50–75 | |
| | с очень высоким содержанием фракции/with ultrahigh content of fraction | 75–100 | |
| Газа, м³/т Gas, m³/t | с низкой газонасыщенностью/with low gas saturation | (less than) менее 200 | |
| | со средней газонасыщенностью/with medium gas saturation | 200–500 | |
| | с высокой газонасыщенностью/with high gas saturation | (more than) более 500 | |
| сернистого газа sulfur gas | с низким содержанием сернистого газа/with low content of sulfur gas | (less than) менее 5 | |
| | с высоким содержанием сернистого газа/with high content of sulfur gas | (more than) более 5 | |

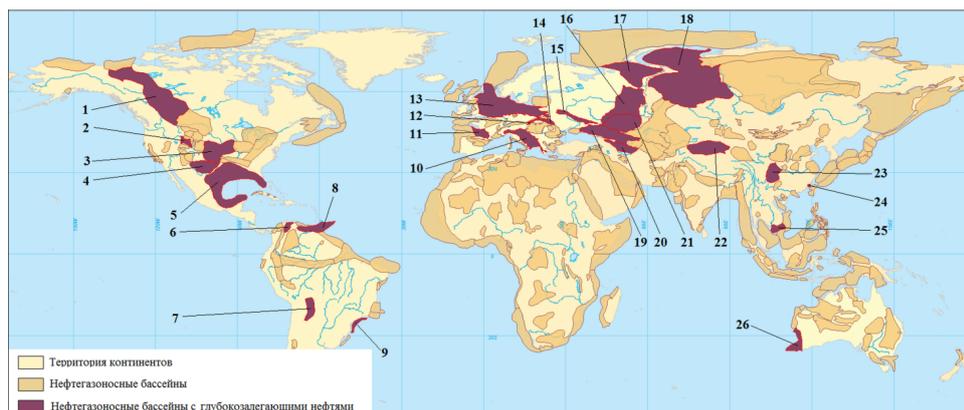


Рис. 1. Схема размещения нефтегазоносных бассейнов с глубокозалегающими нефтями. Бассейны в Северной и Южной Америке: 1 – Западно-Канадский; 2 – Грин-Ривер; 3 – Западный Внутренний; 4 – Пермский; 5 – Мексиканского залива; 6 – Маракаибский; 13 – Центрально-Предандийский; 8 – Оринокский; 9 – Сантос; в Евразии: 10 – Адриатический; 11 – Аквитанский; 12 – Венский; 13 – Центрально-Европейский; 14 – Карпатский; 15 – Днепровско-Припятский; 16 – Волго-Уральский; 17 – Тимано-Печорский; 18 – Западно-Сибирский; 19 – Северо-Кавказский; 20 – Южно-Каспийский; 21 – Прикаспийский; 22 – Таримский; 23 – Сычуаньский; 24 – Северо-Тайваньский; 25 – Вунг-Тау; в Австралии: 26 – Перт

Fig. 1. Map of arrangement of oil-and-gas-bearing basins with deep-seated oils. North and South America: 1 – Western Canadian; 2 – Green River; 3 – Western Interior; 4 – Permian; 5 – Gulf of Mexico; 6 – Maracay; 13 – Central pre-Andi; 8 – Orinoco; 9 – Santos; in Eurasia: 10 – Adriatic; 11 – Aquitanian; 12 – Viennese; 13 – central European; 14 – Carpathian; 15 – Dnieper-Pripet; 16 – Volga-Ural; 17 – Timan-Pechora; 18 – Western Siberian; 19 – North-Caucasian; 20 – South-Caspian; 21 – Caspian; 22 – Tarim; 23 – Szechwan; 24 – North-Taiwan; 25 – Vung Tau; in Australia: 26 – Perth

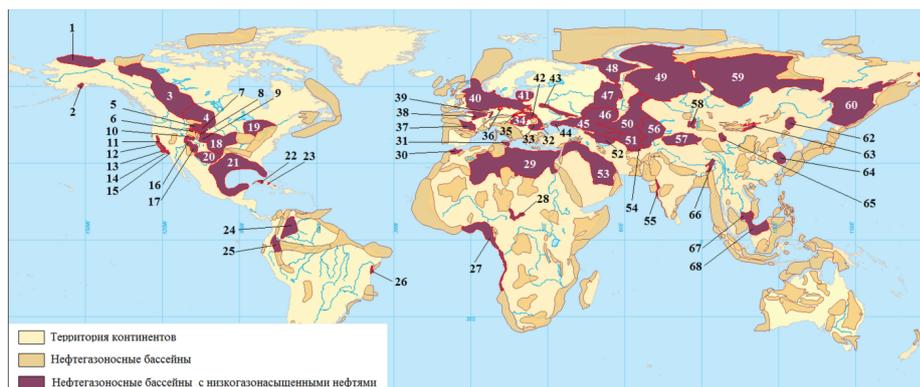


Рис. 2. Схема размещения нефтегазоносных бассейнов с низкогазонасыщенными нефтями. Бассейны в Северной и Южной Америке: 1 – Арктического склона Аляски, 2 – Залив Кука, 3 – Западно-Канадский, 4 – Уиллистонский, 5 – Биг-Хорн, 6 – Уинд-Ривер, 7 – Паундер-Ривер, 8 – Ханна-Ларами, 9 – Денвер, 10 – Уинта-Пайсенс, 11 – Грейт-Валли, 12 – Хаф-Мун-Салинас-Кайама, 13 – Санта-Мария, 14 – Вентура-Санта-Барбара, 15 – Лос-Анджелес, 16 – Парадокс, 17 – Сан-Хуан, 18 – Западный Внутренний, 19 – Мичиганский, 20 – Пермский, 21 – Мексиканского залива, 22 – Северо-Кубинский, 23 – Центрально-Кубинский, 24 – Баринас-Апуре, 25 – Верхнеамазонский, 26 – Реконкаву; в Африке: 27 – Гвинейского залива, 28 – Шари, 29 – Сахаро-Ливийский, 30 – Андалузско-Предрифский; в Евразии: 31 – Сицилийский, 32 – Западно-Черноморский, 33 – Предкарпатско-Балканский, 34 – Паннонский, 35 – Венский, 36 – Тюрингский, 37 – Аквитанский, 38 – Англо-Парижский, 39 – Рейнский, 40 – Центрально-Европейский, 41 – Балтийский, 42 – Карпатский, 43 – Днепровско-Припятский, 44 – Северо-Крымский, 45 – Северо-Кавказский, 46 – Прикаспийский, 47 – Волго-Уральский, 48 – Тимано-Печорский, 49 – Западно-Сибирский, 50 – Туранский, 51 – Амударьинский, 52 – Южно-Каспийский, 53 – Персидского залива, 54 – Каракумский, 55 – Камбейский, 56 – Афгано-Таджикский, 57 – Таримский, 58 – Джунгарский, 59 – Лено-Тунгусский, 60 – Охотский, 61 – Анадырско-Наваринский, 62 – Сунляо, 63 – Восточно-Гобийский, 64 – Желтоморский, 65 – Преднаньшаньский, 66 – Ассамский, 67 – Вунг-Тау, 68 – Саравакский

Рис. 2. Map of arrangement of oil-and-gas bearing basins with low gas saturated oils. Basins in North and South America: 1 – Alaska Arctic side, 2 – Cook Inlet, 3 – Western-Canadian, 4 – Willinston, 5 – Big-Horn, 6 – Wind-River, 7 – Pounder-River, 8 – Hanna-Laramie, 9 – Denver, 10 – Wint-Paisens, 11 – Great Valley, 12 – Half-Moon-Salinas-Kayama, 13 – Santa Maria, 14 – Ventura-Santa-Barbara, 15 – Los-Angeles, 16 – Paradox, 17 – San-Juan, 18 – Western Interior, 19 – Michigan, 20 – Permian, 21 – Gulf of Mexico, 22 – North Cuban, 23 – Central Cuban, 24 – Barinas-Apуре, 25 – Upper Amazon, 26 – Reconkavu; in Africa: 27 – Gulf of Guinea, 28 – Chari, 29 – Sahara-Libyan, 30 – Andalusian-pre-reef; in Eurasia: 31 – Sicilian, 32 – Western-Black Sea, 33 – pre-Carpathian Balkan, 34 – Pannonian, 35 – Viennese, 36 – Thuringien, 37 – Aquitanian, 38 – English-Paris, 39 – Rhine, 40 – Central European, 41 – Baltic, 42 – Carpathian, 43 – Dnepr-Priget, 44 – North Crimea, 45 – North Caucasian, 46 – Pre-Caspian, 47 – Volga-Ural, 48 – Timan-Pechora, 49 – Western Siberian, 50 – Turanian, 51 – Amu-Darya, 52 – South-Caspian, 53 – Persian Gulf, 54 – Kara Kum, 55 – Gulf of Cambay, 56 – Afghan-Tadjik, 57 – Tarim, 58 – Dzungarian, 59 – Lena-Tungus, 60 – Okhotsk, 61 – Anadyr-Navarin-sky, 62 – Sunlyao, 63 – Eastern-Gobi, 64 – Yellow Sea, 65 – Pre Nan-Shan, 66 – Assamese, 67 – Vung Tau, 68 – Sarawak

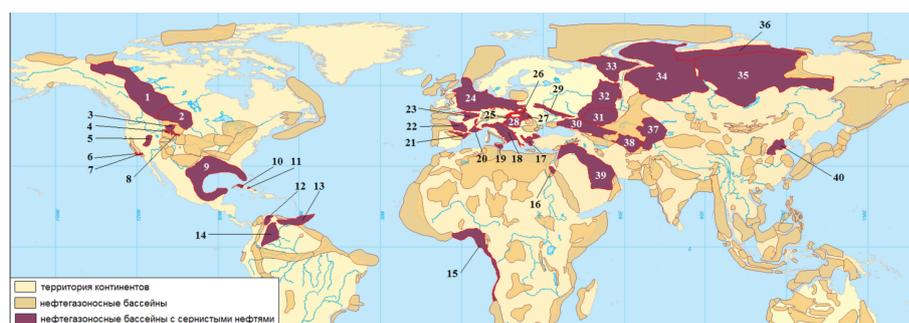


Рис. 3. Схема размещения нефтегазоносных бассейнов с сернистыми нефтями. Бассейны в Северной и Южной Америке: 1 – Западно-Канадский, 2 – Уиллистонский, 3 – Биг-Хорн, 4 – Уинта-Ривер, 5 – Юта-Невадинский, 6 – Санта-Мария, 7 – Вентура-Санта-Барбара, 8 – Ханна-Ларами, 9 – Мексиканского залива, 10 – Северо-Кубинский, 11 – Центрально-Кубинский, 12 – Маракайбский, 13 – Оринокский, 14 – Баринас-Апуре; в Африке: 15 – Гвинейского залива, 16 – Суэцкого залива; в Евразии: 17 – Северо-Эгейский, 18 – Адриатический, 19 – Сицилийский, 20 – Ронский, 21 – Эбро, 21 – Аквитанский, 23 – Англо-Парижский, 24 – Центрально-Европейский, 25 – Венский, 26 – Северо-Предкарпатский, 27 – Карпатский, 28 – Паннонский, 29 – Днепровско-Припятский, 30 – Северо-Кавказский, 31 – Прикаспийский, 32 – Волго-Уральский, 33 – Тимано-Печорский, 34 – Западно-Сибирский, 35 – Лено-Тунгусский, 36 – Енисейско-Анабарский, 37 – Афгано-Таджикский, 38 – Амударьинский, 39 – Персидского залива, 40 – Бохайский

Fig. 3. Map of arrangement of oil-and-gas bearing basins with sulfur oils. Basins in North and South America: 1 – Western-Canadian, 2 – Willinston, 3 – Big-Horn, 4 – Wint River, 5 – Utah-Nevada, 6 – Santa Maria, 7 – Ventura-Santa-Barbara, 8 – Hanna-Laramie, 9 – Gulf of Mexico, 10 – North Cuban, 11 – Central Cuban, 12 – Maracay, 13 – Orinoco, 14 – Barinas-Apуре; in Africa: 15 – Gulf of Guinea, 16 – Gulf of Suez; in Eurasia: 17 – North-Aegean, 18 – Adriatic, 19 – Sicilian, 20 – Rhone, 21 – Ebro, 21 – Aquitanian, 23 – English-Paris, 24 – Central European, 25 – Viennese, 26 – North-pre-Carpathian, 27 – Carpathian, 28 – Pannonian, 29 – Dnepr-Priget, 30 – North Caucasian, 31 – Pre-Caspian, 32 – Volga-Ural, 33 – Timan-Pechora, 34 – Western Siberian, 35 – Lena-Tungus, 36 – Yenisei-Anabar, 37 – Afghan-Tadjik, 38 – Amu-Darya, 39 – Persian Gulf, 40 – Bohai

рис. 1 представлено распределение нефтегазоносных бассейнов с трудноизвлекаемыми нефтями с большой глубиной залегания (индекс качества 0,71), относящихся к классу «нефти высокого качества».

На рис. 2 показано планетарное распределение нефтегазоносных бассейнов с нефтями, характеризующимися низкой газонасыщенностью (индекс качества 0,93), которые относятся к классу «нефти среднего качества».

На рис. 3 показано распределение нефтегазоносных бассейнов с сернистыми нефтями (индекс качества 1,41) с содержанием серы более 3 %, которые относятся к классу «нефти низкого качества».

Особенности физико-химических свойств нефтей низкого качества

Результаты анализа особенностей свойств тяжелых, вязких, смолистых и сернистых нефтей, которые входят в класс нефтей низкого качества (табл. 2), представлены в виде средних значений отдельных характеристик нефтей в табл. 5, из которой видно, что нефти низкого качества оказываются довольно близкими по физико-химическим свойствам. Согласно классификации нефтей по физико-химическим свойствам (табл. 3, 4), все четыре вида нефтей этого класса относятся к нефтям сверхвязким, со средним содержанием парафинов, асфальтенов и фракции н.к. 300 °С, с низким содержанием фракции н.к. 200 °С и нефтяного газа. Однако есть и различия: тяжелые и вязкие ТИН

Таблица 5. Средние значения показателей нефтей низкого качества

Table 5. Average values of low quality oil indices

| Физико-химические показатели Physicochemical indices | тяжелые heavy | вязкие viscous | смолистые resinous | сернистые sulfurous |
|--|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ | 0,9216 | 0,9139 | 0,9035 | 0,9318 |
| Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s | 1839,24 | 2099,02 | 552,28 | 3187,98 |
| Содержание серы, % Sulfur content, % | 1,95 | 1,89 | 2,08 | 4,14 |
| Содержание парафинов, % Paraffin content, % | 3,84 | 4,21 | 4,70 | 3,89 |
| Содержание смол, % Resin content, % | 17,53 | 16,23 | 22,18 | 23,55 |
| Содержание асфальтенов, % Asphalten content, % | 5,14 | 4,63 | 5,88 | 8,46 |
| Фракция до 200 °С, % Fraction up to 200 °C, % | 12,36 | 13,40 | 15,38 | 13,63 |
| Фракция до 300 °С, % Fraction up to 300 °C, % | 28,19 | 30,06 | 30,67 | 28,66 |
| Фракция до 350 °С, % Fraction up to 350 °C, % | 34,71 | 37,53 | 34,56 | 31,31 |
| Газосодержание в нефти, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t | 38,03 | 25,44 | 49,36 | 22,29 |

Таблица 6. Средние значения показателей нефтей среднего качества

Table 6. Average values of medium quality oil indices

| Физико-химические показатели Physicochemical indices | Парафинистые нефти Paraffin oils | Нефти с низкой газонасыщенностью (менее 200 м ³ /т) Oils with low gas saturation (less than 200 m ³ /t) | Нефти с низкой пластовой температурой (менее 20 °С) Oils with low reservoir temperature, (less than 20 °C) | Нефти, залегающие в коллекторах с низкой проницаемостью (менее 0,05 мкм ²) Oil seated in reservoirs with low permeability (less than 0,05 μm ²) | Нефти, залегающие в коллекторах с низкой пористостью (менее 8 %) Oil seated in reservoirs with low porosity (less than 8 %) | Нефти в островной криолитоzone Oils in insular cryolithozone |
|--|-------------------------------------|--|---|--|--|---|
| Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ | 0,8491 | 0,8629 | 0,8829 | 0,8644 | 0,8579 | 0,8429 |
| Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s | 98,72 | 177,45 | 12851,98 | 1493,51 | 8008,87 | 144,11 |
| Содержание серы, % Sulfur content, % | 0,56 | 1,28 | 1,35 | 1,02 | 1,22 | 0,81 |
| Содержание парафинов, % Paraffin content, % | 13,02 | 5,51 | 3,55 | 5,56 | 4,71 | 3,89 |
| Содержание смол, % Resin content, % | 7,78 | 10,69 | 14,24 | 9,13 | 6,61 | 7,68 |
| Содержание асфальтенов, % Asphaltene content, % | 1,96 | 2,80 | 3,96 | 2,81 | 1,67 | 2,20 |
| Фракция до 200 °С, % Fraction up to 200 °C, % | 20,71 | 23,46 | 18,75 | 29,03 | 13,93 | 27,41 |
| Фракция до 300 °С, % Fraction up to 300 °C, % | 40,80 | 41,27 | 32,37 | 40,15 | 34,75 | 44,66 |
| Фракция до 350 °С, % Fraction up to 350 °C, % | 51,82 | 49,55 | 44,03 | 50,75 | – | – |
| Газосодержание в нефти, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t | 105,35 | 62,13 | 35,66 | 81,79 | 152,75 | 84,78 |

являются умеренно-смолистыми, смолистые ТИН – высокосмолистыми и сернистыми нефтями, сернистые ТИН – высокосернистыми. Отметим различия видов нефтей этого класса качества по их плотности. Согласно данным табл. 5, все виды нефтей этого класса, являясь по плотности тяжелыми (по классификации табл. 3), имеют различия: вязкие и смолистые ТИН относятся к виду нефтей повышенной плотности, сернистые и тяжелые – к виду сверхтяжелых нефтей.

Особенности физико-химических свойств нефтей среднего качества

Приведем результаты анализа особенностей свойств трудноизвлекаемых нефтей, относящихся к классу среднего качества, а именно: парафинистых, с низкой газонасыщенностью, залегающих в пластах с низкой температурой и находящихся в низкопористых и слабопроницаемых коллекторах и в зонах распространения островной криолитозоны. Рассчитанные средние значения физико-химических характеристик указанных видов трудноизвлекаемых нефтей представлены в табл. 6, в которой видно, что рассматриваемые виды нефтей значительно различаются между собой по свойствам.

Для выявления сходства и различий свойств рассматриваемых видов ТИН проводится сопоставление данных табл. 6 с интервалами классификации нефтей по физико-химическим свойствам (табл. 3, 4). Показано, что парафинистые нефти следует отнести к нефтям со средней плотностью и повышенной вязкостью, среднесернистым, малосмолистым, малоасфальтовым, высокопарафинистым, со средним содержанием фракций н.к. 200 и 300 °С и низкой газонасыщенностью.

Нефти с низкой газонасыщенностью относятся к нефтям со средней плотностью, высоковязким, сернистым, среднепарафинистым, среднесмолистым и малоасфальтовым, со средним содержанием фракций н.к. 200 и 300 °С.

Нефти из пластов с низкой температурой (менее 20 °С) в среднем относятся к нефтям с повышенной плотностью, сверхвязким, сернистым, среднепарафинистым, умеренно смолистым, среднеасфальтовым и с низким газосодержанием (табл. 6).

Приведем результаты анализа свойств нефтей, заключенных в пластах со слабопроницаемыми (проницаемость менее 0,05 мкм²) и низкопористыми (пористость менее 8 %) коллекторами. Показано, что залегающие в коллекторах с низкой проницаемостью ТИН могут быть отнесены к нефтям со средней плотностью, сверхвязким, сернистым, среднепарафинистым, среднесмолистым, малоасфальтовым, с высоким содержанием фракции н.к. 200 °С, средним содержанием фракции н.к. 300 °С и с низким газосодержанием.

Рассмотрим физико-химические свойства ТИН в низкопористых коллекторах. Результаты сравнения свойств таких нефтей, приведенных в табл.

6, с данными табл. 3, 4 показывают, что в среднем эти нефти могут быть отнесены к нефтям со средней плотностью, сверхвязким, сернистым, среднепарафинистым, малосмолистым и малоасфальтовым, с низкими газосодержанием и содержанием фракции н.к. 200 °С и средним содержанием фракции н.к. 300 °С.

Как видно из табл. 6, физико-химические свойства ТИН, размещенных в зоне распространения островной мерзлоты, являются нефтями со средней плотностью и повышенной вязкостью, среднесернистыми, малосмолистыми, малоасфальтовыми, малопарафинистыми, со средним содержанием фракций н.к. 200 и 300 °С и низкой газонасыщенностью. Заметим, что по большинству свойств этот вид ТИН близок к парафинистой нефти.

Особенности физико-химических свойств нефтей высокого качества

В табл. 7 представлены результаты вычисления средних значений физико-химических характеристик трудноизвлекаемых нефтей высокого качества, к которым относятся следующие нефти: нефти с высоким содержанием нефтяного газа и сероводорода, «горячие» нефти из пластов с высокой температурой, глубинные нефти и расположенные на территории прерывисто-сплошной криолитозоны.

Рассмотрим особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей с высокой газонасыщенностью. На основе сопоставления данных табл. 7 с классификационными интервалами табл. 3, 4, можно показать, что рассматриваемый вид ТИН может быть отнесен к нефтям легким, маловязким, малосернистым, среднепарафинистым, малосмолистым и малоасфальтовым, с высоким содержанием фракций, т. е. к нефтям с высокими качественными показателями.

Рассмотрим особенности физико-химических свойств трудноизвлекаемых нефтей с высоким содержанием сероводорода. На основе сопоставления данных, представленных в табл. 7, можно заключить, что они относятся к нефтям средней плотности и повышенной вязкости, сернистым, среднепарафинистым, среднесмолистым и среднеасфальтовым, со средней газонасыщенностью, с высоким содержанием фракций.

Из табл. 7, где приведены результаты анализа свойств нефти из пластов с высокой температурой, видно, что данные являются легкими, со средней вязкостью, малосернистыми, малосмолистыми и малоасфальтовыми, но умеренно парафинистыми. Как показало сравнение данных из табл. 6, 7, свойства нефтей сильно зависят от температурных условий залегания. Так, наилучшими качественными показателями обладают нефти в пластах с высокой пластовой температурой (табл. 7).

Анализ физико-химических свойств глубокозалегающих нефтей показал, что в среднем они могут быть отнесены к нефтям легким, с повышенной вязкостью, малосернистым, умеренно парафинистым, малосмолистым, малоасфальтовым, с высоким

содержанием фракции н.к. 200 °С и средним содержанием фракции н.к. 300 °С. Выявлено высокое содержание нефтяного газа в этих нефтях, что является осложняющим фактором при нефтедобыче.

Таблица 7. Средние значения показателей нефтей высокого качества

Table 7. Average values of high quality oil indices

| Физико-химические показатели Physicochemical indices | Нефти с высокой газонасыщенностью (более 500 м ³ /т) Oils with high gas saturation (more than 500 m ³ /t) | Нефти с высоким содержанием сернистого газа (более 5 %) Oils with high content of sulfur gas (more than 5 %) | Нефти с высокой пластовой температурой (более 100 °С) Oils with high reservoir temperature (more than 100 °C) | Нефти с большой глубиной залегания (более 4500 м) Oils with deep occurrence (more than 4500 m) | Нефти в прерывисто-сплошной криолитозоне Oils in intermittent-continuous cryolithozone |
|--|--|---|--|---|---|
| Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³ | 0,8112 | 0,8441 | 0,8233 | 0,8339 | 0,8346 |
| Вязкость при 20 °С, мм ² /с Viscosity at 20 °C, mm ² /s | 2,10 | 43,12 | 11,61 | 137,98 | 401,41 |
| Содержание серы, % Sulfur content, % | 0,37 | 1,79 | 0,36 | 0,41 | 0,52 |
| Содержание парафинов, % Paraffin content, % | 5,48 | 4,19 | 9,98 | 7,36 | 4,26 |
| Содержание смол, % Resin content, % | 4,31 | 10,73 | 5,28 | 5,45 | 6,50 |
| Содержание асфальтенов, % Asphaltene content, % | 1,11 | 4,34 | 1,24 | 1,51 | 1,30 |
| Фракция до 200 °С, % Fraction up to 200 °C, % | 40,30 | 35,20 | 29,83 | 29,33 | 31,22 |
| Фракция до 300 °С, % Fraction up to 300 °C, % | 64,70 | 62,90 | 48,63 | 47,65 | 46,59 |
| Фракция до 350 °С, % Fraction up to 350 °C, % | – | – | 59,62 | 59,40 | – |
| Газосодержание в нефти, м ³ /т Gas content in oil, m ³ /t | 790,13 | 249,99 | 187,43 | 448,43 | 102,97 |

Заключение

Исследованы качественные показатели разных видов трудноизвлекаемых нефтей с использованием предложенного индекса качества нефтей, методика расчета которого дана в статье. Для удобства анализа с использованием индекса качества разные виды ТИН разделены на три класса качества. Показано, что четыре вида трудноизвлекаемых

нефтей с аномальными физико-химическими свойствами (тяжелые, вязкие, сернистые и смолистые нефти), запасы которых в мире и в нашей стране огромны, формируют класс низкого качества. Показано, что нефти этого класса качества оказываются довольно близкими по физико-химическим свойствам и относятся к нефтям сверхвязким, со средним содержанием парафинов, асфальтенов и фракции н.к. 300 °С, и с низким содержанием фракции н.к. 200 °С.

Класс нефтей высокого качества включает следующие виды ТИН: нефти с высоким содержанием сероводорода и высоким газосодержанием, «горячие» нефти из пластов с высокой температурой, нефти с большой глубиной залегания и нефти, расположенные на территории прерывистой и сплошной зон многолетней мерзлоты. Показано, что наиболее высокие качественные показатели имеют нефти с высокой газонасыщенностью, которые являются легкими, маловязкими, малосернистыми, умеренно парафинистыми, малосмолистыми и малоасфальтеновыми, с высоким содержанием светлых фракций. В этот класс входят и перспективные для будущего освоения нефти из месторождений в зонах прерывистой и сплошной мерзлоты, которые относятся к малосернистым, малосмолистым, малоасфальтеновым, среднепарафинистым и с высоким содержанием фракции н.к. 350 °С. По индексу качества ТИН этого вида имеют более высокий уровень качества по сравнению с нефтями, расположенными в островной зоне мерзлоты и вне ее.

Наблюдаемый рост доли трудноизвлекаемых видов нефтей в общем объеме добычаемых нефти в мире в связи с сокращением запасов легкодоступных нефтей ведет к непрерывному усилению негативного влияния на окружающую среду территорий, связанных с обустройством месторождений, нефтедобычей, транспортировкой и нефтепереработкой. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для формирования стратегии защиты окружающей среды при освоении месторождений с трудноизвлекаемыми нефтями.

Существующая технология транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам, ориентированная на пропуск больших объемов нефти, приводит к смешиванию нефтей из разных месторождений с различными физико-химическими характеристиками, что неизбежно приводит к существенному изменению качественных показателей образующейся смеси и оказывает влияние на снижение стоимости товарной нефти. В связи с этим приведенные в статье материалы могут быть использованы для оптимизации маршрутов транспортировки трудноизвлекаемых нефтей.

Приведенные в статье результаты исследований могут быть использованы при разработке новых и усовершенствовании существующих методов и технологий добычи и переработки нефтей с аномальными физико-химическими свойствами, а также при решении других задач нефтяной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуртова И.П., Вариченко А.И., Шпуров И.В. Трудноизвлекаемые запасы нефти. Терминология. Проблемы и состояние освоения в России // Наука и ТЭК. – 2011. – № 6. – С. 21–26.
2. Ибраев В.И. Прогнозирование напряженного состояния коллекторов и флюидоупоров нефтегазовых залежей в Западной Сибири. – Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2006. – 208 с.
3. Лисовский Н.Н., Халимов Э.М. О классификации трудноизвлекаемых запасов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2009. – № 6. – С. 33–35.
4. Халимов Э.М. Геотехнологии разведки и разработки нефтяных месторождений. Избранные труды (1958–2000 гг.). – М.: ИГиРГИ, 2001. – 656 с.
5. Халимов Э.М. Концепция дифференцированной ставки налога на добычу полезных ископаемых // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2004. – № 11. – С. 44–50.
6. Лукьянов Э.Г., Тренин Ю.А., Деревягин А.А. Достоверность геолого-геофизической информации для оценки извлекаемых (рентабельных) запасов нефти // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 1. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Lukyanov/Lukyanov_1.pdf (дата обращения: 26.05.2014).
7. Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб.: Изд-во «Недра», 2005. – 372 с.
8. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и закономерности размещения / под ред. А.А. Новикова. – Томск: В-Спектр, 2014. – 154 с.
9. Максудов Р., Орлов Г., Осипов А. Освоение запасов высоковязких нефтей в России // Технологии ТЭК. – 2005. – № 6. – С. 36–40.
10. Антониади Д.Г., Кошелев А.Т., Пустовой П.А. Проблемы повышения добычи нефти в условиях месторождений России // Нефть. Газ. Новации. – 2010. – № 12. – С. 60–63.
11. Рыльков А.В., Потеряев В.В. Нафтенновые нефти мира (распространение, генезис, применение) // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 1. – С. 32–43.
12. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Statistical Analysis of Regional Variation in the Chemical Composition of Eurasian Crude Oils // Petroleum Chemistry. – 2001. – V. 41. – № 4. – P. 247–251.
13. Polichtchouk Yu.M., Yashchenko I.G. Possible Correlations between Crude Oil Chemical Composition and Reservoir Age // Journal of Petroleum Geology. – 2006. – V. 29. – № 2. – P. 189–194.
14. Валитов Ш.М., Туфетулов А.М., Яртиева А.Ф. Влияние качества нефти на эффективность ее переработки // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 12. – С. 132–135.
15. Хафизов Ф.З. Анализ запасов нефти / науч. ред. А.Э. Конторович. – Тюмень: ИД «ИздатНаукаСервис», 2011. – 228 с.
16. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Analysis of Eurasian oils quality // Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry. – 2002. – № 1. – P. 66–68.
17. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
18. Атлас СССР / отв. ред. Т.П. Сидоренкова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. – 260 с.
19. Павлов А.В., Аманбаева Г.В. Оценка современных изменений температур воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли. – 2004. – Т. 8. – № 2. – С. 3–9.
20. Duchkov A.D. Characteristics of Permafrost in Siberia // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. NATO Science Series IV. – 2006. – V. 65. – P. 81–92.
21. Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of Permafrost in Russia // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. NATO Science Series IV. – 2006. – V. 65. – P. 69–80.
22. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Comparative analysis of the chemical composition of oils in Russia in permafrost territory and outside of it // Earth's Cryosphere. – 2007. – V. 11. – № 1. – P. 45–52.
23. Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Heavy oils: Regularities of spatial distribution // Neftyanoe Khozyaistvo – Oil Industry. – 2006. – № 2. – P. 110–113.
24. Яценко И.Г., Полищук Ю.М. География высокомолекулярных нефтей и особенности их физико-химических свойств // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 99–102.

Поступила 27.10.2014 г.

UDC 553.982

STATISTICAL ANALYSIS OF QUALITY OF HARD-TO-RECOVER OILS

Irina G. Yashchenko,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, 634021, Tomsk, Russia. E-mail: src@ipc.tsc.ru

Yuri M. Polishchuk,

Dr. Sc., Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskoy Avenue, 634021, Tomsk, Russia. E-mail: ovs@ipc.tsc.ru

Relevance of the research is determined by the need to study the quality parameters of hard-to-recover oils, considered as the main base of oil production growth in the medium term due to the depletion of easily accessible oil. Insufficient knowledge of the qualitative features of these oils creates the difficulties for assessing the prospects and identifying the ways of development of domestic oil and gas complex.

The main aim of the study is to analyze the qualitative indicators of various types of hard-to-recover oils using the index of oil quality proposed by the authors, including a study of the features of physicochemical properties and the conditions of occurrence of different types of oils, belonging to different classes of quality (low, medium and high).

The methods used in the study: classification of oils by complex quality index and totality of measured physical and chemical characteristics and conditions of occurrence and study on the base of statistical analysis methods of the characteristics of different classes of hard-to-recover oils determined by the results of the classification.

The results. The authors proposed a new quality index of hard-to-recover oils. It used for the classifications of hard-to-recover oils for physical and chemical parameters and the index of the oil quality. The paper introduces a brief description of different types of hard-to-recover oils, belonging to different classes of quality. The peculiarities of physical and chemical properties of hard-to-recover oils of low, medium and high quality classes were studied on the base of the analysis of 19000 samples of oils. The research results can be used in the development of new and improvement of existing methods and technologies of oil extraction, refining and transportation of oil with abnormal physical and chemical properties or with complicated conditions of occurrence.

Key words:

Hard-to-recover oils, oil classification, oil-bearing basin, physical and chemical oil properties, index of oil quality, oil quality class.

REFERENCES

- Purtova I.P., Varichenko A.I., Shpurov I.V. Trudnoizvlekaemye zapasy nefiti. Terminologiya. Problemy i sostoyanie osvoeniya v Rossii [The reserves of hard-to-recover oil. Terminology. Problems and the state of development in Russia]. *Nauka i TJeK*, 2011, no. 6, pp. 21–26.
- Ibraev V.I. *Prognozirovanie napryazhennogo sostoyaniya kolektorov i flyuidoporov neftegazovykh zalezhey v Zapadnoy Sibiri* [Prediction of the stress state of collectors and immobile fluid of oil and gas deposits in Western Siberia]. Tyumen, Tyumen Publ. House, 2006. 208 p.
- Lisovsky N.N., Khalimov E.M. O klassifikatsii trudnoizvlekaemykh zapasov [Classification of difficult oil]. *Vestnik CKR Rosndra*, 2009, no. 6, pp. 33–35.
- Khalimov E.M. *Geotekhnologii razvedki i razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy. Izbrannye trudy (1958–2000 gg.)* [Geotechnology of exploration and development of oil fields]. Moscow, IGIRGI Publ., 2001. 656 p.
- Khalimov E.M. Kontseptsiya differentsirovannoy stavki naloga na dobychu poleznykh iskopaemykh [The concept of differentiated tax rate on mining mineral]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2004, no. 11, pp. 44–50.
- Lukyanov E.G., Trenin Yu.A., Derevyagin A.A. Dostovernost geologo-geofizicheskoy informatsii dlya otsenki izvlekaemykh (rentabelnykh) zapasov nefiti [Reliability of geological and geophysical information for oil reserves evaluation]. *Neftegazovoe delo*, 2008, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/authors/Lukyanov/Lukyanov_1.pdf (accessed 26 May 2014).
- Yakutseni S.P. *Rasprostranennost uglevodorodnogo syr'ya, obogoshchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Otsenka ekologicheskikh riskov* [Prevalence of hydrocarbons enriched with heavy elements impurities. Environmental risk assessment]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 372 p.
- Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. *Trudnoizvlekaemye nefiti: fiziko-khimicheskie svoystva i zakonomernosti razmeshcheniya* [Hard-to-recover oil: physico-chemical properties and patterns of distribution]. Ed. by A.A. Novikov. Tomsk, V-Spektr Publ., 2014. 154 p.
- Maksutov R., Orlov G., Osipov A. Osvoenie zapasov vysokoviskozikh neftey v Rossii [The development of high-viscosity oil reserves in Russia]. *Tekhnologii TJeK*, 2005, no. 6, pp. 36–40.
- Antoniadi D.G., Koshelev A.T., Pustovoy P.A. Problemy povysheniya dobychi nefiti v usloviyakh mestorozhdeniy Rossii [The issue of improved oil production at the oilfields of Russia]. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2010, no. 12, pp. 60–63.
- Rylkov A.V., Poteryaev V.V. Naftenovye nefiti mira (rasprostranenie, genezis, primenenie) [Naphthenic oil of the world (distribution, genesis, application)]. *Izvesniya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Nefn i gas*, 2013, no. 1, pp. 32–43.
- Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Statistical Analysis of Regional Variation in the Chemical Composition of Eurasian Crude Oils. *Petroleum Chemistry*, 2001, vol. 41, no. 4, pp. 247–251.
- Polichtchouk Yu.M., Yashchenko I.G. Possible Correlations between Crude Oil Chemical Composition and Reservoir Age. *Journal of Petroleum Geology*, 2006, vol. 29, no. 2, pp. 189–194.
- Valitov Sh.M., Tufegulov A.M., Yartiev A.F. Vliyanie kachestva nefiti na effektivnost ee pererabotki [Impact of oil quality on the efficiency of its processing]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2012, no. 12, pp. 132–135.
- Khafizov F.Z. *Analiz zapasov nefiti* [Analysis of oil reserves]. Ed. by A.E. Kontorovich. Tyumen, IzdatNaukaServis Publ. House, 2011. 228 p.
- Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Analysis of Eurasian oils quality. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2002, no.1, pp. 66–68.
- Geokriologiya SSSR. Evropeyskaya territoriya SSSR* [Geocryology of the USSR. European territory of the USSR]. Ed. by E.D. Ershova. Moscow, Nedra Publ., 1988. 358 p.
- Atlas SSSR* [Atlas of the USSR]. Ed. by T.P. Sidorenko. Moscow, Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1984. 260 p.
- Pavlov A.V., Ananeva G.V. Otsenka sovremennykh izmeneniy temperatur vozdukha na territorii kriolitozony Rossii [Assessment of current changes in air temperature on the territory of Russia Cryolithozone]. *Kriosfera Zemli*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 3–9.
- Duchkov A.D. Characteristics of Permafrost in Siberia. *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. NATO Science Series IV*, 2006, vol. 65, pp. 81–92.
- Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of Permafrost in Russia. *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. NATO Science Series IV*, 2006, vol. 65, pp. 69–80.
- Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Comparative analysis of the chemical composition of oils in Russia in permafrost territory and outside of it. *Earth's Cryosphere*, 2007, vol. 11, no. 1, pp. 45–52.
- Polishchuk Yu.M., Yashchenko I.G. Heavy oils: Regularities of spatial distribution. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2006, no. 2, pp. 110–113.
- Yashchenko I.G., Polishchuk Yu.M. Geografiya vysokosmolistykh neftey i osobennosti ikh fiziko-khimicheskikh svoystv [Geography of high resins oil and peculiarities of their physico-chemical properties]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 99–102.

Received: 27 October 2014.

УДК 550.36:553.041:553.98

ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ДОЮРСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ УСТЬ-ТЫМСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЕОТЕРМИИ И БУРЕНИЯ)

Лобова Галина Анатольевна,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Пракойо Феликс Санто,

аспирант кафедры геофизики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: felix.santo@yahoo.com

Ахметов Ермак Мауленович,

канд. геол.-минерал. наук, зав. кафедрой геофизики Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22. E-mail: aem.47@mail.ru

Исаева Ольга Степановна,

руководитель Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу», Россия, 634034, г. Томск, ул. Мокрушина, д. 9, стр. 16. E-mail: isaeva_sah@mail.ru

Актуальность исследований: необходимость воспроизводства и расширения ресурсной базы нефтепромыслов юго-востока Западной Сибири.

Цель исследований: определить и предложить первоочередные районы для поисков и освоения доюрского нефтегазонасного комплекса на слабоизученной территории Усть-Тымской мегавпадины и структур ее обрамления.

Объект исследований: доюрские резервуары – коллекторы триасовой коры выветривания и коллекторы палеозойского фундамента. Коллекторы коры выветривания образованы по глинисто-кремнистым породам и вулканитам кислого состава, флюидоупором служат ниже-среднеюрские глинистые толщи. Вторичные коллекторы в коренном фундаменте развиты по метаморфическим и магматическим породам, флюидоупорами могут служить глинистые образования коры выветривания или непроницаемые породы внутри фундамента.

Методы исследований включают геокартирование резервуаров, анализ распределения плотности генерированных нефтей, оценку и анализ распределения плотности ресурсов первично-аккумулированных нефтей, районирование резервуаров по степени перспективности.

В результате исследований систематизирован комплекс геолого-геофизических данных по объекту изучения. Дана объемно-площадная характеристика доюрских резервуаров – по данным глубокого бурения построены карты толщин и качества коллекторов, с учетом петротипов коренных пород и интенсивности разрывной тектоники. Проанализировано распределение плотности генерированных нефтей, полученное на основе картирования по геотемпературному критерию палеоочагов генерации в тогурских материнских отложениях. Построены карты распределения относительной плотности аккумулятивных ресурсов, и выполнено районирование резервуаров. Предложены первоочередные зоны поисков для резервуара коры выветривания – северо-восточный борт Усть-Тымской мегавпадины, для резервуара пород фундамента – северо-восточный склон Северо-Парабельской мегамоноклинали и южная часть Пыжинского мезопргиба. Результаты демонстрируют технологию прогнозирования нефтегазонасности, с привлечением палеотемпературного моделирования. Сделан вывод о ценности данных геотермии, позволяющих решать концептуальную задачу об источнике углеводородов.

Ключевые слова:

Доюрские резервуары, плотность ресурсов нефтей, районирование, геотермия, Усть-Тымская мегавпадина.

Введение

О перспективах нефтегазонасности пород фундамента Западно-Сибирской плиты еще в 30–40-е гг. XX в. высказывались И.М. Губкин, Н.С. Шатский, М.М. Чарыгин, М.К. Коровин [1]. Позднее, в 70-е гг., перспективность доюрских отложений в отношении нефтегазонасности отмечали в своих работах А.А. Трофимук, В.С. Сурков, А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, Ю.Г. Эрвье, Н.П. Запивалов [2 и др.]. Однако ряд вопросов поисков нефти в доюрском основании до сих пор не

сит дискуссионный характер, открытие месторождений в доюрском нефтегазонасном комплексе имеет скорее случайный характер, чем закономерный [3].

Усть-Тымская мегавпадина расположена в переходной зоне Левобережье-Правобережье р. Обь, в Томской области (рис. 1). Интерес к этой территории обуславливается определенной общностью нефтегазовой геологии с нефтепромысловыми районами Нюрольской мегавпадины. Кроме того, эта зона, как *переходная*, интересна тем, что расшире-

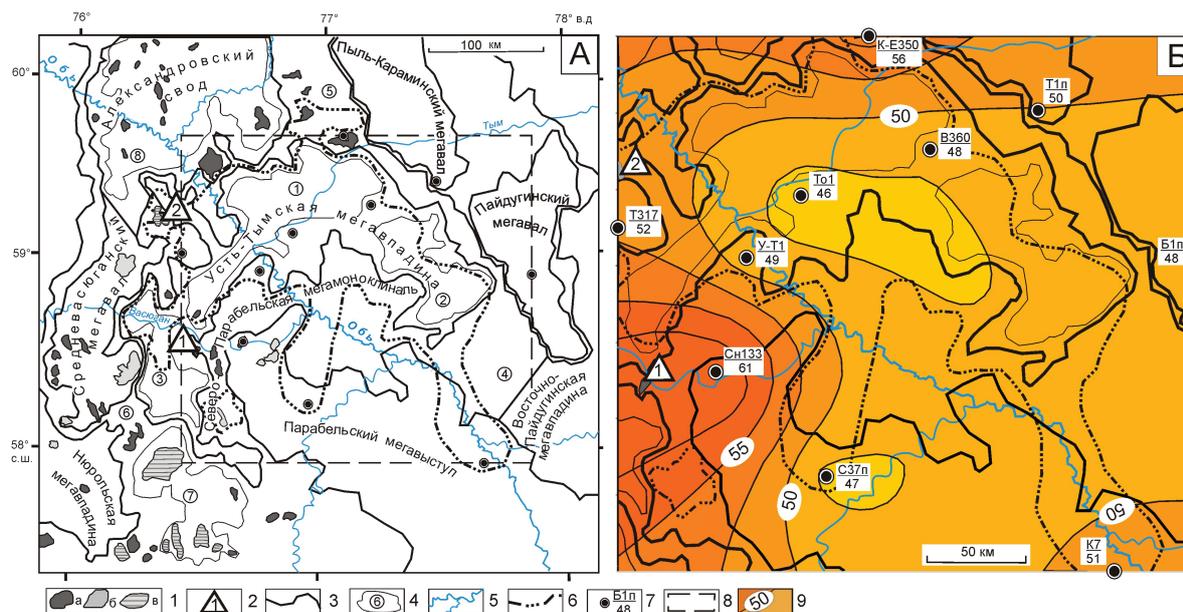


Рис. 1. Обзорная схема территории исследования (А) на структурно-тектонической основе [5] и схема распределения значений плотности теплового потока из доюрского основания [6, с уточнениями] (Б): 1 – месторождения: а – нефтяное, б – газовое, в – газоконденсатное; 2 – условный номер месторождения с залежами в доюрском НГК; границы тектонических элементов: 3 – I порядка, 4 – II порядка и условный номер структуры; 5 – речная сеть; 6 – граница зоны распространения тогурской свиты; 7 – скважина палеотемпературного моделирования: в числителе условный индекс, в знаменателе – расчетное значение плотности теплового потока, мВт/м²; 8 – контур территории построения прогнозных карт; 9 – изолинии значений расчетной плотности теплового потока, мВт/м². Месторождения: 1 – Ясное, 2 – Чкаловское. Структуры II порядка: 1 – Неготский мезопрогиб, 2 – Пыжинский мезопрогиб, 3 – Сампатский мезопрогиб, 4 – Зайкинская мезоседловина, 5 – Караминская мезоседловина, 6 – Шингинская мезоседловина, 7 – Пудинское мезоподняtie, 8 – Трайгородский мезовал. Скважины: К-Е350 – Киев-Еганская 350, Т1п – Тымская 1 параметрическая, Б1п – Береговая 1 параметрическая, К7 – Колпашевская 7, С37п – Сенькинская 37 параметрическая, Сн133 – Снежная 133, У-Т1 – Усть-Тымская 1, То1 – Толпаровская 1, Т317 – Трассовая 317, В360 – Вертолетная 360

Fig. 1. Review scheme of the territory under study (A) on structural and tectonic base [5] and pattern of heat flow density value distribution from pre-Jurassic basement [6, with clarification] (B): 1 – fields: a – oil, b – gas, v – gas-condensate; 2 – reference number of the oilfield with deposits in pre-Jurassic oil-and-gas bearing complex; boundaries of tectonic elements of the: 3 – I order, 4 – II order and reference number of the structure; 5 – river system; 6 – boundary of the distribution area of Togur strata; 7 – well of paleotemperature modeling: conventional index is in numerator, rated value of heat flow density is in denominator, mW/m²; 8 – contour of the territory of plotting forecast maps; 9 – isolines of the values of heat flow design density, mW/m². Oil fields: 1 – Yasnoe, 2 – Chkalovskoe. Structures of the II order: 1 – Negotsky meso-deflection, 2 – Pyzhinsky meso-deflection, 3 – Sampatsky meso-deflection, 4 – Zaykinskaya meso-saddle, 5 – Karaminskaya meso-saddle, 6 – Shinginskaya meso-saddle, 7 – Pudinskoe meso-high, 8 – Traygorodsky meso-bar. Oil fields: K-E350 – Kiev-Eganskaya 350, T1n – Tymskaya 1 parametric, B1n – Beregovaya 1 parametric, K7 – Kolpashevskaya 7, C37n – Senkinskaya 37 parametric, Sn133 – Snezhnaya 133, U-T1 – Ust-Tymskaya 1, To1 – Tolparovskaya 1, T317 – Trassovaya 317, B360 – Vertoletnaya 360

ние ресурсной базы углеводородов (УВ) Томской области возможно за счет новых земель в Правобережье Оби. Здесь перспективы связываются с нижнеюрскими и доюрскими резервуарами [4].

Объектом настоящих прогнозных исследований являются доюрские резервуары – коллекторы триасовой коры выветривания и коллекторы коренных пород фундамента.

Основной нефтегенерирующей толщей для нижнеюрского и доюрского НГК является тогурская свита с рассеянным органическим веществом (РОВ) гумусово-сапропелевого типа [7]. Толщины тогурской свиты достигают 50 м, концентрация $C_{орг}$ – до 5 %, катагенетическая преобразованность РОВ – на уровне градации МК₁¹–МК₂, что определяет региональный генерационный потенциал свиты. Тогурская свита картируется [5] в центральных и восточных частях мегавайдины, а так-

же заливообразно – в северной и юго-восточной части Парабельского мегавыступа и озерообразно – в южной части Северо-Парабельской мегамоноклинали (рис. 1А). Кроме того, отложения тогурской свиты встречены в разрезе скв. 20 и 22 месторождения Ясное.

Проблематичность миграции нефти из тогурских отложений в нижележащие коллекторы находит разрешение в результатах послойного изучения «прямыми» методами органической геохимии продуктивных, над- и подпродуктивных отложений. Так, согласно полученным результатам по Рогожниковской группе месторождений Красноленинского свода [8, 9], расстояние вертикального межпластового перемещения УВ из нижнеюрской (нефтепроизводящей) зоны в доюрские разуплотненные отложения составляет 150...250 м.

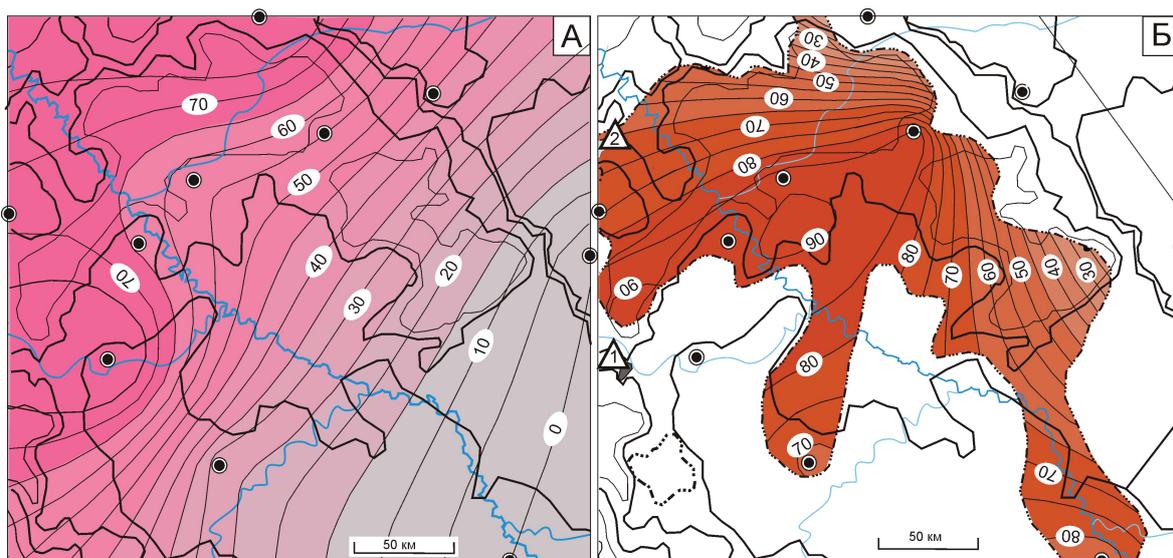


Рис. 2. Схематические карты распределения значений плотности генерированных баженовских (А) и тогурских (Б) нефтей Усть-Тымской мегавпадины (значения изолиний в усл. ед.). Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. Contour maps of distribution of generated bazhenov (A) and togur (Б) oils density values in Ust-Tym megadepression (values of isolines are in arbitrary units). The rest symbols are the same as in Fig. 1

Ранее [6, 10] выполнены расчеты плотности теплового потока из основания осадочного разреза (рис. 1Б) и сделана оценка распределения плотности генерированных баженовских и тогурских нефтей Усть-Тымской мегавпадины и структур её обрамления (рис. 2). Оценка выполнена на основе применения метода палеотемпературного моделирования [11, 12] для разрезов 10 представительных скважин (рис. 1) и картирования по геотемпературному критерию палеоочагов генерации нефти.

Балансовая модель процессов нефтегазообразования [13] позволила по геотемпературному критерию выполнить картирование очагов интенсивного образования нефтей из РОВ тогурских отложений: с $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ – вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразования (ГЗН).

Примененный подход оценки плотности генерированных нефтей [14] кумулятивно учитывает динамику геотемператур материнских отложений, изменение расчетной плотности генерированных ресурсов напрямую зависит от времени нахождения материнской свиты в ГЗН и от геотемператур ГЗН. Известно, что превышение значения энергии активации керогена обеспечивается за счет прироста геотемпературы [15, 16].

Оценка плотности ресурсов генерированных тогурских нефтей выполнена в условных единицах, что является достаточным для последующего площадного районирования. На локальном участке распространения тогурской свиты (в юго-западной части территории исследований) плотность генерированных ресурсов тогурских нефтей не могла быть корректно оценена из-за отсутствия здесь представительной скважины, необходимой для палеотемпературных расчетов.

Цель настоящих исследований – определить и предложить первоочередные районы (участки) для изучения и освоения доюрских резервуаров – коллекторов коры выветривания и коллекторов палеозойского фундамента. Кроме того, проведенные исследования и результаты, изложенные в [6, 10] и ниже, призваны продемонстрировать технологию использования данных геотермии в решении задач нефтегазовой геофизики.

Геотермия – это ценный геофизический метод и при решении фундаментальных геодинамических и палеоклиматических проблем [17–22], и в региональных нефтегеологических и металлогенических исследованиях [23–25], и в прогнозно-поисковых работах [26–28]. Особая ценность данных геотермии проявляется в прогнозно-поисковых исследованиях. Ценность состоит в том, что на начальном этапе исследований по геотемпературному критерию определяются очаги генерации нефти. Так решается концептуальная задача о «главном источнике» углеводородов, решение которой определяет эффективность стратегии поисков [29].

Краткая характеристика нефтегазоносности территории

В Усть-Тымском нефтегазоносном районе (НГР) выделяются следующие НГК: палеозойский с нефтегазоносным горизонтом зоны контакта, нижнеюрский (геттанг-раннетоарский, позднетоар-ааленский), среднеюрский (байос-батский), верхнеюрский (келловей-волжский) и меловой (неокомский).

В палеозойском НГК улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами обладают породы, развитые по измененным карбонатным и терригенно-карбонатным образованиям палеозоя.

Перспективы связываются и с триасовой корой выветривания по метаморфическим и магматическим породам палеозоя. В пределах Усть-Тымской мегавпадины открыты залежи углеводородов в отложениях коры выветривания на Ясном и Чкаловском месторождениях (табл. 1). Получены прямые признаки нефтенасыщения пород коры выветривания при бурении скв. Толпаровской 2.

Нижнюю часть *нижнеюрского НГК* слагают породы урманской свиты с пластами Ю₁₇₋₁₆. Верхнюю часть НГК представляют песчано-глинистые отложения салатской свиты, в юго-восточной части территории – пешковской свиты с пластами Ю₁₅₋₁₄.

Среднеюрский НГК формируется в объеме тюменской свиты, в которой выделяется серия резервуаров (Ю₁₃₋₂).

Верхнеюрский НГК объединяет отложения, формировавшиеся в разных фациальных условиях. В западной части территории исследований формируется васюганская свита. Разрез верхневасюганской подсвиты содержит песчаные пласты, совокупность которых формирует регионально-нефтегазоносный горизонт Ю₁.

Меловой НГК охватывает разрез неокома и характеризуется преимущественным развитием неантиклинальных ловушек литологического и комбинированного типов. Залежи приурочены к клиноформному и шельфовому комплексам.

Нефтегенерирующей толщей для мелового и верхнеюрского НГК являются верхнеюрские баженовские отложения и ее возрастные аналоги. Анализ распределения (рис. 2А) показывает, что на юго-восток (Правобережье Оби) расчетная плотность генерированных баженовских нефтей закономерно и существенно уменьшается. А плотность ресурсов тогурских нефтей (рис. 2Б) высока во всей области распространения тогурской свиты. Поэтому приоритетными для изучения определены нижнеюрские и палеозойские отложения на землях распространения тогурской свиты [6].

Распространение резервуара отложений коры выветривания

НГК, приуроченный к корам выветривания разновозрастных пород фундамента, выходящего на доюрскую поверхность, назван нефтегазоносным горизонтом зоны контакта – НГТЗК [30]. Наиболее высокими емкостными свойствами обладают породы коры выветривания, образованные по кремнисто-карбонатным, глинисто-кремнистым породам и вулканитам кислого состава различного возраста [31, 32]. Флюидоупором для залежей в резервуарах коры выветривания служат нижне-среднеюрские глинистые толщи. Наши исследования ограничены зоной распространения тогурской свиты, а значит, для открытых здесь залежей покрывкой будут служить нижнеюрские локальный левинский и/или региональный китербютский флюидоупоры. При выклинивании нижнеюрских толщ роль покрывки выполняют среднеюрские локальные лайдинская и/или леонтьевская глинистые пачки (В.С. Сурков и др. «Литолого-фациальные...», 1999, материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу»).

С использованием фондовых материалов (В.И. Волков «Создание систематизированной ...», 2000, Томский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу») проанализированы результаты бурения 38 скважин, вскрывших доюрский фундамент. На схематической карте (рис. 3А), построенной по вскрытым толщинам, отмечается неравномерное площадное распространение отложений кор выветривания. От максимальных значений на периферии к центру территории исследования идет уменьшение толщин до полного выклинивания.

С использованием фондовых материалов (В.С. Сурков, Л.В. Смирнов «Структурно-формационные зоны ...», 2000, Смирнов Л.В. и др. «Сопоста-

Таблица 1. Характеристика месторождений Усть-Тымской мегавпадины с залежами в доюрском нефтегазоносном комплексе
Table 1. Characteristic of the fields of Ust-Tym megadepression with deposits in pre-Jurassic oil-and-gas bearing complex

| Нефтегазоносная область Oil-and-gas bearing area | НГР Petroleum district | Месторождение Oil field | Категория по запасам Category by reservoir | НГК Oil-and-gas bearing complex | Фазовое состояние Phase state | Пласт, горизонт Bed, horizon |
|---|---|----------------------------|---|------------------------------------|---|---|
| Пайдугинская Payduginskaya | Усть-Тымский Ust-Tym | Ясное Yasnoe | Мелкое Small | Верхнеюрский Upper-Jurassic | Нефть/Oil | Ю ₁ ⁴ |
| | | | | Доюрский Pre-Jurassic | Нефть/oil | НГТЗК Oil-and-gas bearing horizon of contact surface |
| Васюганская Vasyuganskaya | Средне-Васюганский Srednevasyugansky | Чкаловское Chkalovskoe | | Верхнеюрский Upper-Jurassic | Нефть разгазированная Dead oil | Ю ₁ ¹ |
| | | | | Доюрский Pre-Jurassic | Нефть, конденсат, газ Oil, condensate, gas | НГТЗК Oil-and-gas bearing horizon of contact surface |
| | | | | | Нефть/Oil | PZ |

Данные из «Государственного баланса запасов ..., 2012» (фондовые материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу»).

The data are from «State balance of reservoirs..., 2012» (fund materials of Tomsk branch of «Territory fund of geological information in Siberian Federal district»)

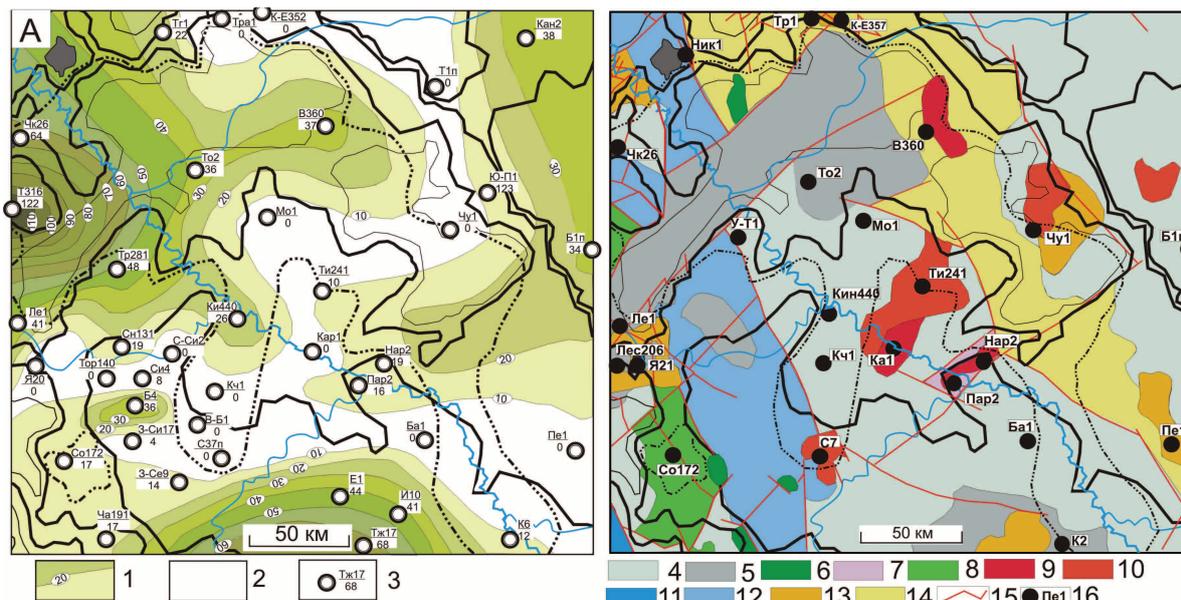


Рис. 3. Схематические карты распространения пород коры выветривания (А) и распространения петротипов пород фундамента [33, 34] (Б) Усть-Тымской мегавпадины. А: 1 – изопакхиты отложений коры; 2 – зона отсутствия коры выветривания; 3 – скважина, использованная для построения карты изопакхит: в числителе условный индекс, в знаменателе – мощность коры. Б: фации комплексов пород фундамента: 4 – аспидная; 5 – базальтовая; 6 – базиты; 7 – глинисто-кремнистая; 8 – глинисто-сланцевая; 9 – гранодиориты; 10 – гранитоиды; 11 – карбонатная; 12 – терригенно-карбонатная; 13 – риолитовая; 14 – терригенная; 15 – тектонические нарушения; 16 – скважина, вскрывшая породы фундамента, ее условный индекс. Остальные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 3. Contour maps of distribution of weathering crust rocks (A) and basement rock petrotypes [33, 34] (B) in Ust-Tym megadepression. A: 1 – isopachytes of crust deposits; 2 – area without weathering crust; 3 – the well used for plotting the map of isopachytes: conventional index in numerator, crust depth is in denominator. B: facies of basement rock complexes: 4 – aspid; 5 – basalt; 6 – basite; 7 – argillaceous-siliceous; 8 – argillaceous-shaly; 9 – granodiorites; 10 – granitoids; 11 – carbonate; 12 – terrigenous-carbonate; 13 – rhyolite; 14 – terrigenous; 15 – tectonic faults; 16 – the well tapping the basement rock, its conventional index. The rest symbols are the same as in Fig. 1

вительный анализ ...», 2002, Томский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу») и опубликованных данных [33, 34] проанализированы петротипы пород фундамента, выходящих на доюрскую поверхность (рис. 3Б). Гранитоидные, гранодиоритовые и риолитовые магматические тела, имеющие здесь распространение, подвергаясь гипергенным процессам, создают предпосылки к образованию коллекторов с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС). Таким образом, зоны выхода глинисто-кремнистых и магматических пород кислого состава на поверхность фундамента учтем как зоны распространения улучшенных коллекторов. Образование коры выветривания по породам аспидной формации, как и по глинисто-сланцевым формациям, не способствует формированию хороших коллекторов [35]. Коллекторы с неблагоприятными ФЕС формируются в коре выветривания, образованной по магматическим породам основного состава и по породам глинисто-сланцевой формации. Учтем и зоны коллекторов коры выветривания с неблагоприятными ФЕС (рис. 4А).

Оценка распределения плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей в отложениях коры выветривания и районирование резервуара зоны контакта

При использовании карты распределения плотности генерированных тогурских нефтей (рис. 2Б) и карты толщин отложений коры выветривания (рис. 3А), построена схематическая карта распределения относительной плотности первично-аккумулятивных тогурских нефтей в резервуаре коры выветривания (рис. 4А).

Карта названа схематической картой распределения относительной плотности ресурсов. Здесь относительная плотность ресурсов понимается так. Если на участке скв. Вертолетная 362 (В362) плотность ресурсов резервуара оценена в 20 усл. ед., а на участке скв. Чкаловская 26 (Чк26) – в 40 усл. ед. (рис. 4А), то это значит, что на первом участке прогнозируемая плотность ресурсов резервуара в 2 раза меньше, чем плотность ресурсов на втором участке (отношение 1:2).

На рис. 4А видно, что район с наибольшей плотностью ресурсов (более 20 усл. ед.) протягивается широкой полосой с запада на восток, охваты-

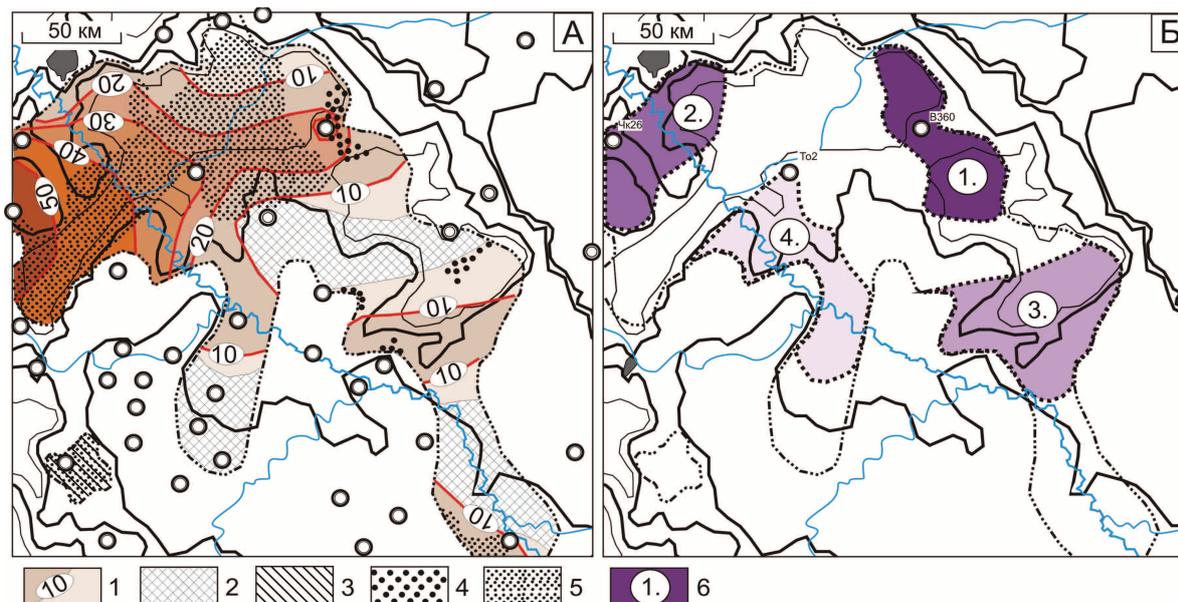


Рис. 4. Схема соотношения распределения плотности генерированных тогурских нефтей и качества коллекторов в резервуаре коры выветривания (А) и схема выделения первоочередных участков для поисков залежей углеводородов в отложениях коры выветривания (Б) Усть-Тымской мегавпадины. А: 1 – изолинии плотности генерированных нефтей, усл. ед.; 2 – зона отсутствия коры выветривания в пределах распространения тогурской свиты; 3 – зона отсутствия оценки плотности генерированных тогурских нефтей; 4 – зона коллекторов коры выветривания с улучшенными ФЕС; 5 – зоны коллекторов коры выветривания с неблагоприятными ФЕС. Б: 6 – перспективный участок, номер ранжирования. Интенсивность закрашки площади участка пропорциональна степени перспективности земель. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 3А

Fig. 4. Map of relation of generated togur oil density distribution with collector quality in weathering crust reservoir (A) and map of selection of high priority areas for searching hydrocarbon deposits in weathering crust formations (B) in Ust-Tym megadepression. A: 1 – isolines of generated oil density, arbitrary units; 2 – area without weathering crust within togur strata; 3 – area without estimation of generated togur oil density; 4 – area of reservoirs of weathering crust with the advanced porosity and permeability; 5 – areas of weathering crust reservoirs with negative porosity and permeability. B: 6 – potential area, ranking number. The intensity of area coloring is proportional to the degree of the area potential. The rest symbols are the same as in Fig. 3A

вая южные склоны Трайгородского мезавала, западную и центральную части Неготского мезопрогиба, северо-западный локальный участок Северо-Парабельской мегамоноклинали и затем, значительно сужаясь, охватывает юго-восточный борт Неготского мезопрогиба и прилегающую зону сочленения с Пыжинским мезопрогибом и северным склоном Северо-Парабельской мегамоноклинали.

В табл. 2 приведено сопоставление *результатов районирования резервуара коры выветривания* (рис. 4Б) и данных по испытанию отложений зоны контакта в глубоких скважинах.

Выделение первоочередных участков для поисков в отложениях коры выветривания Усть-Тымской мегавпадины проводим с учетом качества коллектора в резервуаре. Наибольший интерес в отношении перспектив нефтегазоносности представляет *участок 1*, который объединяет земли северо-восточного борта Усть-Тымской мегавпадины. В пределах этого участка расположена скважина Вертолетная 360 (В360), при бурении которой были вскрыты доюрские породы, но испытание на продуктивность в этой части разреза не проводилось.

Северный борт Неготского мезопрогиба и зона его сочленения с восточным склоном Трайгородского мезовала – перспективный *участок 2*. При «среднем» качестве коллектора на этом участке отмечается высокое значение относительной плотности тогурских нефтей, а полученный приток УВ из интервала коры выветривания при испытании в скв. 26 Чкаловского месторождения (Чк26) подтверждает высокую перспективность этого участка.

Перспективный *участок 3* тектонически приурочен к южному борту Пыжинского мезопрогиба и зоне его сочленения на юге – с северной частью Зайкинской мезоседловины, на западе – с восточным склоном Северо-Парабельской мегамоноклинали. Однако о прямых признаках нефтенасыщения разреза на этом участке сведений в настоящее время нет.

Локальный *участок 4*, расположенный в центральной части Северо-Парабельской мегамоноклинали и сопредельном южном врезе Усть-Тымской мегавпадины, по ранжированию идет на четвертом месте. При бурении скв. Толпаровская 2 (То2) из интервала коры выветривания был поднят керн с признаками нефтенасыщения, что подтверждает перспективность этого участка.

Таблица 2. Сопоставление результатов районирования резервуара коры выветривания и данных по испытанию отложений зоны контакта глубоких скважин Усть-Тымской мегавпадины (*ранжирование по степени перспективности)**Table 2.** Comparison of the results of weathering crust reservoir zoning and the data on testing the deposits of contact area of deep wells in Ust-Tym megadepression (*ranking by potential degree)

| Район, участок* (рис. 4Б) Region, area* (Fig. 4B) | Ресурсы, усл. ед./ качество коллектора Resources, arb. units/ Reservoir quality | Скважины, распо- ложенные в районе Wells in the region | Результаты испытания Test results | | | Нефте- проявле- ния Oil show |
|--|--|--|---|--|---|---------------------------------------|
| | | | Пласт (объект) Bed (object) | Приток, м ³ /сут Influx, m ³ /day | Тип флюида Fluid type | |
| 1 | 10–20/улучшенные ФЕС (advanced porosity and permeability) | Вертолетная 360 (В360) Vertoletnayae | НГГЗК Oil-and-gas bearing horizon of contact surface | Не испытывался Was not tested | | – |
| 2 | 20–50/«средние» ФЕС («medium» porosity and permeability) | Чкаловская 26 (Чк26) Chkalovskaya 26 | | 50 | Нефть кон-денсат, газ Oil, condensate, gas | – |
| 3 | 10/улучшенные ФЕС (advanced porosity and permeability) | – | – | – | – | |
| 4 | 10–20/«средние» ФЕС («medium» porosity and permeability) | Толпаровская 2 (То2) Tolparovskaya 2 | НГГЗК Oil-and-gas bearing horizon of contact surface | – | – | В керне In core |
| За пределами распростра- нения тогурской свиты Out of togur strata expansion | – | Никольская 3 Nikolskaya 3 | | 1,6 | Вода Water | – |

Результаты испытания глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин», геологических отчетов Каргасокской нефтеразведочной экспедиции (фондовые материалы Томского филиала ФГУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу»).

The test results of deep wells were studied and reduced from initial «well histories», geological reports of Kargasok petroleum exploration expedition (fund materials of Tomsk branch of «Territory fund of geological information in Siberian Federal district»).

Можно отметить, что резервуар НГГЗК, вскрытый скв. Никольская 3 за пределами распространения нефтематеринской тогурской свиты, водоносен.

Таким образом, выделяем и предлагаем первоочередной район для изучения и освоения резервуара коры выветривания Усть-Тымской мегавпадины – участок 1 – зону северо-восточного борта мегавпадины, где высокая плотность ресурсов аккумулярованных тогурских нефтей и улучшенные ФЕС коллекторов.

Палеозойский резервуар

В доюрском НГК, наряду с резервуаром коры выветривания, интерес представляют и залежи УВ в гетерогенном разновозрастном резервуаре коренного фундамента [36]. Скопления УВ в коренных породах фундамента образуют как массивные, так и тектонически, литологически экранированные локальные залежи. Залежи приурочены к вторичным коллекторам по осадочным, метаморфическим и магматическим породам. Флюидопорами могут служить глинистые образования коры выветривания или экраны из непроницаемых карбонатных или магматических пород внутри палеозойского фундамента.

Основной нефтегенерирующей толщей для образований залежей УВ в верхних толщах коренных пород фундамента, как и для резервуара коры выветривания, являются отложения тогурской свиты [7]. Экспериментальные исследования показали, что вклад юрского источника для залежей

доюрского НГК при определенных структурно-формационных условиях достигает 98 % [37].

Наилучшими ФЕС обладают коллекторы, образованные в результате метасоматической проработки магматических пород кислого состава и глинисто-кремнистые разности. В зонах распространения магматических пород основного и ультраосновного состава, а также глинистых сланцев существуют неблагоприятные условия для формирования вторичных коллекторов [38–42].

Формирование вторичных коллекторов происходит в тектонически ослабленных зонах активной флюидомиграции. Такие зоны напрямую связаны с проявлением дизъюнктивной тектоники, вызывающей повышенную трещиноватость горных пород, что само по себе влечет за собой улучшение фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

Таким образом, наличие кислых магматических пород или глинисто-кремнистых образований является критерием (руководящим признаком) для выделения в коренном фундаменте областей с потенциально улучшенными ФЕС. А интенсивность разрывной тектоники является руководящим признаком для разделения этих областей на зоны с лучшими, хорошими и удовлетворительными ФЕС.

При использовании схемы распространения петротипов пород фундамента и тектонических нарушений (рис. 3Б), выделены области пород фундамента с потенциально улучшенными ФЕС, потенциально средними ФЕС и с потенциально неблаго-

приятными ФЕС (рис. 5А). Затем, с учетом интенсивности разрывной тектоники в фундаменте, определены зоны коллекторов с лучшими, хорошими и удовлетворительными ФЕС.

Оценка распределения плотности ресурсов первично-аккумулятивных тогурских нефтей в коренных породах фундамента и районирование палеозойского резервуара

Сопоставлением зон коллекторов лучших, хороших и удовлетворительных ФЕС с распределением значений плотности генерированных тогурских нефтей, выделены и проранжированы четыре перспективных участка (рис. 5Б).

1 участок, представленный зоной коллекторов с лучшими ФЕС, объединяет земли северо-восточного склона Северо-Парабельской мегамоноклинали и примыкающей южной части Пыжинского мезопргиба. Разломы трассируют границы и пересекают вкрест простирания тектонические структуры в пределах всего участка. К разломам приурочены выходы гранитов. Значения плотно-

сти ресурсов тогурских нефтей изменяются от 85 усл. ед на западе до 25 усл. ед. на востоке.

2 участок, представленный зоной коллекторов с хорошими ФЕС, протягивается вдоль северо-восточного борта Усть-Тымской мегавпадины. Здесь в фундаменте присутствуют гранитоиды, в северной части участка закартирован разлом. Плотность ресурсов тогурских нефтей высокая – возрастает от 50 до 80 усл. ед.

3 участок также представлен зоной коллекторов с хорошими ФЕС. Участок занимает земли у южного вреза Северо-Парабельской мегамоноклинали и сопредельную часть Парабельского мегавыступа. На юге участка картируется небольшой Сенькинский гранитный массив, который разбит серией разломов. Плотность ресурсов тогурских нефтей высокая – от 70 до 85 усл. ед.

4 участок, представленный зоной коллекторов с удовлетворительными ФЕС, приурочен к сочленению северо-западного борта Усть-Тымской мегавпадины и структур прилегающего Александровского свода. Территория разбита серией разло-

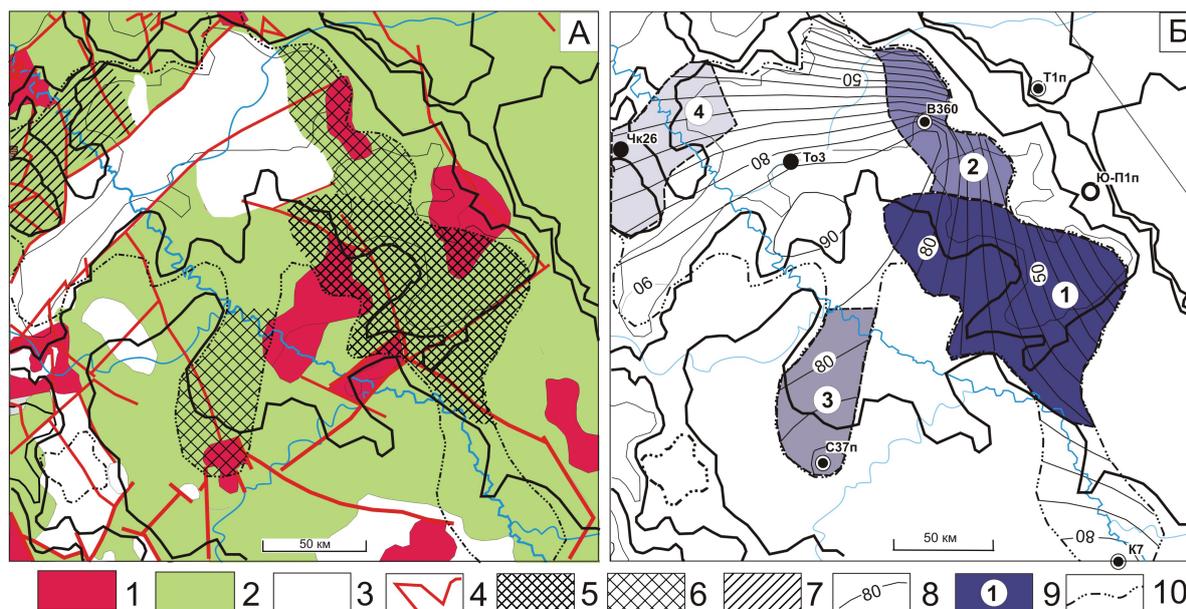


Рис. 5. Схема распределения петротипов пород, тектонических нарушений и качества коллекторов в палеозойском фундаменте (А) и схема выделения первоочередных участков для поисков залежей углеводородов в палеозойском резервуаре (Б) Усть-Тымской мегавпадины. А: 1 – область петротипов пород с потенциально улучшенными ФЕС; 2 – область петротипов пород с потенциально средними ФЕС; 3 – область петротипов пород с потенциально неблагоприятными ФЕС; 4 – тектонические нарушения; 5 – зона коллекторов с лучшими ФЕС; 6 – зона коллекторов с хорошими ФЕС; 7 – зона коллекторов с удовлетворительными ФЕС. Б: 8 – изолинии значений плотности генерированных тогурских нефтей, усл. ед.; 9 – перспективный участок, номер ранжирования (интенсивность закрашки площади участка пропорциональна степени перспективности участка); 10 – граница распространения нефтематеринской тогурской свиты. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 1, 3

Fig. 5. Map of distribution of rock petrotypes, tectonic faults and reservoir quality in Paleozoic basement (A) and map of selection the areas of high priority for searching the hydrocarbon deposits in Paleozoic reservoir (B) in Ust-Tym megadepression. A: 1 – area of rock petrotypes with potentially advanced porosity and permeability; 2 – area of rock petrotypes with potentially medium porosity and permeability; 3 – area of rock petrotypes with potentially negative porosity and permeability; 4 – tectonic faults; 5 – area of reservoirs with the best porosity and permeability; 6 – area of reservoirs with good porosity and permeability; 7 – area of reservoirs with sufficient porosity and permeability. B: 8 – isolines of the values of generated togur oil density, arb. units; 9 – potential area, ranking number (intensity of area coloring is proportional to the degree of the area potential); 10 – boundary of distribution of oil source togur strata. The rest symbols are the same as in Fig. 1, 3

мов разной направленности. Плотность ресурсов тогурских нефтей варьирует от 50 до 80 усл. ед.

В табл. 3 приводится сопоставление результатов районирования палеозойского резервуара и данных, полученных при бурении и испытании скважин, вскрывших фундамент. На *участке 1*, выделенном как первоочередной, прямого подтверждения о нефтегазности нет из-за отсутствия фактического материала. На *участке 2* на Вертолетной площади в скв. 360 палеозойские породы вскрыты, но не испытывались на продуктивность. На *участке 3* имеются данные по скв. 37, пробуренной на Сенькинской площади, при испытании которой притока практически не получено. Прямое подтверждение прогноза получено на *участке 4*, где палеозойские отложения в скв. Чкаловская 26 оказались продуктивными.

Отмечаем, что отложения палеозоя, вскрытые скважинами Тымская 1 (Т1п) и Южно-Пыжинская 1 (Ю-П1п) за пределами распространения тогурской нефтематеринской свиты, водоносны или без притока.

Таким образом, выделяем и предлагаем первоочередной район для изучения и освоения палеозойского резервуара Усть-Тымской мегавпадины – участок 1, объединяющий земли северо-восточно-

го склона Северо-Парабельской мегамоноклинали и примыкающей южной части Пыжинского мезо-прогиба.

Явно не согласуется наш прогноз по палеозойскому резервуару – высокая плотность ресурсов нефти и неудовлетворительные ФЕС коллектора – с результатами испытания скв. Толпаровская 3 (То3) – табл. 3. Конечно, можно объяснить факт коллектора с удовлетворительным ФЕС положением скважины на продолжении разлома северо-западного простирания, а водонасыщенность коллектора – расформированием залежи под влиянием этого же разлома. Но это дополнительная условность, требующая детальной проработки. Вместе с тем отметим, что в остальном выполненный прогноз нефтегазности и районирование доюрских резервуаров согласуется сопоставлением с данными опробования и испытаний 12 интервалов 9 глубоких скважин.

Выводы

1. Реализованная технология анализа комплекса геолого-геофизических данных, ведущая роль в которых принадлежит результатам моделирования термической истории нефтематеринских отложений, определила первоочередные райо-

Таблица 3. Сопоставление результатов районирования резервуара палеозойского фундамента и данных бурения и испытания глубоких скважин (*ранжирование по степени перспективности)

Table 3. Comparison of the results of Paleozoic basement reservoir zoning and the data of drilling and testing deep wells (*ranking by prospectivity degree)

| Район, участок* (рис. 5Б) Region, area* (Fig. 5B) | Ресурсы, усл. ед./ качество коллектора Resources, arb. units/reservoir quality | Скважины, расположенные в районе Wells in the region | Результаты испытания Test results | | |
|---|--|---|--------------------------------------|--|---|
| | | | Пласт (объект) Bed (object) | Приток, м ³ /сут Influx, m ³ /day | Тип флюида Fluid type |
| 1 | 25...85/лучшие ФЕС (the best porosity and permeability) | – | – | – | – |
| 2 | 50...80/хорошие ФЕС (good porosity and permeability) | Вертолетная 360 (В360) Vertoletnaya 360 | PZ | Не испытывался Was not tested | |
| 3 | 70...85/хорошие ФЕС (good porosity and permeability) | Сенькинская 37п (С37п) Senkinskaya 37п | PZ | 0,25 | Фильтрат бурового раствора Drilling mud filtrate |
| | | | PZ | «Сухо» «Dry» | – |
| 4 | 50...80/удовлетворительные ФЕС (sufficient porosity and permeability) | Чкаловская 26 (Чк26) Chkalovskaya 26 | PZ | 100..500 | Нефть/Oil |
| В пределах распространения тогурской свиты Within togur strata expansion | 80/неудовлетворительные ФЕС (insufficient porosity and permeability) | Колпашевская 7 (К7) Kolpashevskaya 7 | PZ | 0,5 | Вода+пленка нефти Water+oil film |
| | 80/неудовлетворительные ФЕС (insufficient porosity and permeability) | Толпаровская 3 (То3) Tolparovskaya 3 | PZ | 0,7...4,5 | Вода Water |
| За пределами распространения тогурской свиты Out of togur strata expansion | – | Тымская 1 (Т1п) Tymkaya 1 | PZ | 0,9 | |
| | – | Южно-Пыжинская 1 (Ю-П1п) Yuzno-Pyzhinskaya 1 | PZ | «Сухо» «Dry» | – |

Результаты испытания глубоких скважин изучены и сведены из первичных «дел скважин» (фондовые материалы Томского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Сибирскому федеральному округу») и опубликованных данных по скв. Чкаловская 26 [39].

The results of testing deep wells were studied and reduced from the primary «well histories» (fund materials of Tomsk branch of «Territory fund of geological information in Siberian Federal district») and from the published data on the well Chkalovskaya 26 [39].

- ны и участки для изучения и освоения доюрских резервуаров Усть-Тымской мегавпадины.
2. В качестве первоочередного района поисков залежей нефти в резервуаре коры выветривания выделена и предложена перспективная зона северо-восточного борта Усть-Тымской мегавпадины. Эта зона сочетает высокую плотность ресурсов тогурских нефтей и улучшенные фильтрационно-емкостные свойства коллекторов.
 3. В качестве первоочередного района поисков залежей нефти в палеозойском резервуаре выделен и предложен перспективный участок, объединяющий земли северо-восточного склона Северо-

ро-Парабельской мегамоноклинали и примыкающей южной части Пыжинского мезопргиба. Этот участок сочетает высокую плотность ресурсов тогурских нефтей и лучшие фильтрационно-емкостные свойства коллекторов.

4. Проведенные исследования и их результаты продемонстрировали технологию и ценность привлечения данных геотермии для прогнозирования нефтегазоносности доюрских резервуаров. На начальном этапе исследований по геотемпературному критерию определены очаги генерации нефти, т. е. решена концептуальная задача о «главном источнике» углеводородов, определяющая эффективность стратегии поисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеров И.И. Проблемы геологии нефти и газа второй половины XX века: избранные труды / под ред. А.Э. Конторовича. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 608 с.
2. Геология нефти и газа Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Ю.Г. Эрвье. – М.: Недра, 1975. – 680 с.
3. Проблемы поиска и разведки промышленных скоплений нефти и газа в трещинно-кавернозных массивных породах доюрского комплекса Западной Сибири / В.Л. Шустер, С.А. Пуанова, А.В. Самойлова, В.Б. Левянт // Геология нефти и газа. – 2011. – № 2. – С. 26–33.
4. Ростовцев В.Н., Резник С.Н. Юрский комплекс Чулым-Тымского междуречья – перспективный объект для поисков нефти и газа в Правобережье Оби Томской области – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 164 с.
5. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
6. Лобова Г.А. Очаги генерации и первично-аккумулятивные ресурсы баженовских нефтей Усть-Тымской мегавпадины // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 122–128.
7. Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2011. – 331 с.
8. Распределение ароматических углеводородов в разрезе отложений нефтегазоносных комплексов (на примере месторождений Красноленинского свода) / Ю.В. Коржов., В.И. Исаев, А.А. Жильцова, О.В. Латыпова // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 1. – С. 113–129.
9. Генезис доюрских залежей нефти Рогожниковской группы месторождений (по результатам изучения вертикальной зональности алканов) / Ю.В. Коржов, В.И. Исаев, М.Я. Кузина, Г.А. Лобова // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 51–56.
10. Лобова Г.А. Нефтегазоносность Усть-Тымской мегавпадины // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 4. – С. 28–39.
11. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimentary Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravimetry and Geothermy Data / R.Yu. Gulenok, V.I. Isaev, V.Yu. Kosygin, G.A. Lobova, V.I. Starostenko // Russian Journal of Pacific Geology. – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 273–287.
12. Нефтегазоносность нижнемеловых резервуаров Нюрольской мегавпадины / Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова, В.И. Исаев, В.И. Старостенко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 1. – С. 14–33.
13. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) / Л.М. Бурштейн, Л.В. Жидкова, А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
14. Лобова Г.А., Попов С.А., Фомин А.Н. Локализация прогнозных ресурсов нефти юрско-меловых нефтегазоносных комплексов Усть-Тымской мегавпадины // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 36–40.
15. Tissot В.Р. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2003. – V. 58. – № 2. – P. 183–202.
16. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование процессов генерации и эмиграции углеводородов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 104–110.
17. Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid circulation or paleoclimate? / I.T. Kukkonen, I.V. Golovanova, Yu.V. Khachay, V.S. Druzhinin, A.M. Kosarev, V.A. Scharov // Tectonophysics. – 1997. – V. 276. – P. 63–85.
18. Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data / D.Yu. Demezhko, D.G. Ryzkin, V.I. Outkin, A.D. Duchkov, V.T. Balobaev // Climate of the Past. – 2007. – V. 3. – P. 559–563.
19. Кутас Р.И. Геотермические разрезы земной коры и верхней мантии Черного моря и его северного обрамления // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33. – № 6. – С. 50–67.
20. Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Тагирова Ч.Д. Методика расчета глубинных температур с учетом исправленных на влияние палеоклимата значений теплового потока // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 9. – С. 1426–1435.
21. Vertical variation in heat flow on the Kola Peninsula: paleoclimate or fluid flow? / C. Vogt, D. Mottaghy, V. Rath, G. Marquart, L. Dijkshoorn, A. Wolf, C. Clauser // Geophysical Journal International. – 2014. – V. 199. – P. 829–843.
22. Исаев В.И., Рылова Т.Б., Гумерова А.А. Палеоклимат Западной Сибири и реализация генерационного потенциала нефтематеринских отложений // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 93–102.
23. Трехмерная геотермическая модель Карского шельфа и прогноз нефтегазоносности / Л.В. Подгорных, М.Д. Хуторской, И.С. Грамберг, Ю.Г. Леонов // Доклады РАН. – 2001. – Т. 380. – № 2. – С. 333–338.
24. Новые данные о тепловом потоке в центральной части Кольского полуострова / В.Н. Глазнев, И.Т. Кукконен, А.Б. Раевский, Я. Екинён // Доклады РАН. – 2004. – Т. 396. – № 1. – С. 1–3.
25. Дучков А.Д., Истомин В.Е., Соколова Л.С. Геотермический метод обнаружения газовых гидратов в донных осадках акваторий // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 7. – С. 920–929.

26. Лопатин Н.В. Концепция нефтегазовых генерационно-аккумуляционных систем как интегрирующее начало в обосновании поисково-разведочных работ // Геоинформатика – 2006. – № 3. – С. 101–120.
27. Галушкин Ю.И., Ситар К.А., Куницина А.В. Численное моделирование преобразования органического вещества осадочных горных пород северо-восточного шельфа Сахалина // Океанология. – 2011. – Т. 51. – № 3. – С. 521–531.
28. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the NyuroI'ka megadepression // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55. – P. 1418–1428.
29. Сунгурова О.Г., Мазуров А.К., Исаев В.И. Ресурсоэффективная стратегия поисков залежей нефти в доюрском основании Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 147–154.
30. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазоаккумуляции) // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 538–547.
31. Запивалов Н.П., Исаев Г.Д. Критерии оценки нефтегазоносности палеозойских отложений Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 341. – С. 226–232.
32. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Коры выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 77–81.
33. Недоливко Н.М., Ежова А.В. Петрографический состав и история формирования зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений на Чкаловском нефтяном месторождении (по данным скважины 26) // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 36–43.
34. Лифанов В.А. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности нижнеюрских базальных горизонтов юго-востока Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО. Т. 1. – Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2012. – С. 252–257.
35. Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Формация коры выветривания в осадочном цикле Западно-Сибирского бассейна // Геология нефти и газа. – 1990. – № 11–12. – С. 22–30.
36. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation) // Russian Geology and Geophysics. – 2007. – V. 48. – P. 422–428.
37. Стратегия и основы технологии поисков углеводородов в доюрском основании Западной Сибири / В.И. Исаев, Г.А. Лобова, Ю.В. Коржов, М.Я. Кузина, Л.К. Кудряшова, О.Г. Сунгурова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 112 с.
38. Кошляк В.А. Гранитоидные коллекторы нефти и газа. – Уфа: Изд-во «Тauf», 2002. – 242 с.
39. Density Modeling of the Basement of Sedimentary Sequence and Prediction of Oil-Gas Accumulation: Evidence from South Sakhalin and West Siberia / V.I. Isaev, R.Yu. Gulenok, O.S. Isaeva, G.A. Lobova // Russian Journal of Pacific Geology. – 2008. – V. 2. – № 3. – P. 191–204.
40. Ковешников А.Е., Недоливко Н.М. Вторично-катагенетические преобразования доюрских пород Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 82–86.
41. Ахметов Е.М., Куддеев Е.И., Истекова С.А. Петрофизическое обоснование и методика интерпретации ГИС в продуктивных пластах месторождения Узень (Казахстан) // Промысловая геофизика в 21-ом веке: Тезисы докладов. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – С. 119–121.
42. Isaev V.I., Nguen H.B. Cavitation in Oil-Gas Reservoirs of the Crystalline Basement from the Well Logging Data on the White Tiger Field in Vietnam // Russian Journal of Pacific Geology. – 2013. – V. 7. – № 4. – P. 237–246.

Поступила 11.01.2015.

UDC 550.36:553.041:553.98

ASSESSMENT OF PETROLEUM POTENTIAL OF THE PRE-JURASSIC RESERVOIRS OF UST-TYM MEGADEPRESSION (USING THE DATA OF GEOTHERMICS AND DRILLING)

Galina A. Lobova,

Cand Sc., National research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lobovaga@tpu.ru

Felix S. Prakoyo,

National research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: felix.santo@yahoo.com

ErmeK M. Akhmetov,

Cand Sc., K.I. Satpayev Kazakh National Technical University, 22, Satpayev Street, Almaty, 050013, Kazakhstan. E-mail: aem.47@mail.ru

Olga S. Isaeva,

Tomsk branch of Federal State Institution «Territorial geological fund across Siberian Federal District», bld. 16, 9, Mokrushin Street, Tomsk, 634050 Russia. E-mail: isaeva_sah@mail.ru

Relevance of research is caused by the necessity to reproduce and to expand the resource base of oilfields in southeast of Western Siberia.

The main aim of the research is to define and to propose the priority areas for exploration and development of pre-Jurassic oil and gas complexes in the poorly studied territory of Ust-Tym megadepression and structures of its framing.

Object of research is the pre-Jurassic reservoir, that is the collectors of Triassic weathering crust and the collectors of Paleozoic basement. The collectors of weathering crust are formed on clay and siliceous rocks and volcanic rocks of acid composition, the lower-middle Jurassic clay thicknesses serve as fluid seal. The secondary collectors in the bedrock basement are developed on metamorphic and magmatic rocks, clay formations of bark of aeration or impermeable rocks in the basement can serve as fluid seal.

Methods of researches include reservoirs geomapping, analysis of generated oil density distribution, evaluation and analysis of density distribution of primary accumulated oils reservoirs, zoning of reservoirs according to the prospectivity degree.

As a result of researches the authors have systematized the complex of geological and geophysical data on the object of research and have given the volumetric-areal characterization for pre-Jurassic reservoirs – the maps of the total thickness and quality collectors were plotted by the deep drilling, taking into account petro types of bedrocks and intensity of breaking tectonics. The generated oil density distribution, obtained based on mapping by geotemperature criterion of generation paleohearth in Togur maternal deposits, was analyzed. The authors plotted the maps of distribution of accumulated resources relative density, carried out reservoir zoning and proposed the areas of priority for searching for weathering crust reservoir – northeast side of Ust-Tym megadepression, for basement rocks reservoir – the north-eastern slope of the North-Parabel megamonoklin and the Southern-Pyzhinsk mezodeflexion. The results show the technique of predicting oil-and-gas presence with attraction of paleotemperature modeling. The authors made a conclusion on the value of geothermal data, which allow solving a conceptual problem of the source of hydrocarbons.

Key words:

Pre-Jurassic reservoirs, density of oil resources, zoning, geothermy, Ust-Tym megadepression.

REFERENCES

1. Nesterov I.I. *Problemy geologii nefiti i gaza vtoroy poloviny XX veka: izbrannye trudy* [Problems of petroleum geology in the second half of the XXth century: selected works]. Ed. by A.E. Kontorovich. Novosibirsk, SB RAS Publishing House, 2007. 608 p.
2. Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Ervye Yu.G. *Geologiya nefiti i gaza Zapadnoy Sibiri* [Geology of oil and gas of Western Siberia]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 680 p.
3. Shuster V.L., Punanova S.A., SamoiloVA A.V., Leviant V.B. *Problemy poiska i razvedki promyshlennykh skopleny nefiti i gaza v treshchinno-kavernoznykh massivnykh porodakh doyrskogo kompleksa Zapadnoy Sibiri* [Problems of searching and exploring for commercial oil and gas accumulations in fracture-cavernous massive rocks of pre-Jurassic complex of West Siberia]. *Geologiya nefiti i gaza – Geology of oil and gas*, 2011, no. 2, pp. 26–33.
4. Rostovtsev V.N., Reznik S.N. *Yurskiy kompleks chulym-tymskogo mezhdurechya – perspektivnyy obekt dlya poiskov nefiti i gaza v Pravoberezhye Obi Tomskoy oblasti* [The Jurassic complex of Chulym-Tymsk interfluvium – perspective object for searches of oil and gas in the Right bank of Ob of the Tomsk region]. Tomsk, Tomsk university Publ., 2004. 164 p.
5. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegasoznosnost mezozoysko-kaynozoysskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and petroleum potential of the Mesozoic-Cenozoic deposits of southeastern regions of West Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2002. 253 p.
6. Lobova G.A. *Ochagi generatsii i pervichno-akkumulirovannye resursy bazhenovskikh neftey ust-tymskoy megavpadiny* [The generation centers and primary-accumulated resources of Bazhenov oils in the Ust-Tym megadepression]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 122–128.
7. Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegasoznosnost mezozoyskikh i paleozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and petroleum potential of Mesozoic and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk, INGG SB RAS Publ., 2011. 331 p.

8. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Zhiltsova A.A., Latipova O.V. Raspre-delenie aromatischeskikh uglevodorodov v razreze otlozheny nef-tegazonosnykh kompleksov (na primere mestorozhdeny Krasno-leninskogo svoda) [Distribution of aromatic hydrocarbons in a sec-tion of deposits of oil-and-gas complexes (by the example of the fields of the Krasnoleninsk arch)]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 113–129.
9. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Kuzina M.Ya., Lobova G.A. Genezis do-yurskikh zalezhey nefti Rogozhnikovskoy gruppy mesto-rozhdeny (po rezul'tatam izucheniya vertikalnoy zonalnosti alka-nov) [Genesis of deposits of oil of Rogozhnikov group of fields (based on the study of the vertical zonation of alkanes)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 51–56.
10. Lobova G.A. Neftegazonosnost Ust-Tymskoy megavpadiny [Oil-and-gas presence of Ust-Tym mega-depression]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2013, vol. 35, no. 4, pp. 28–39.
11. Gulenok R.Yu., Isaev V.I., Kosygin V.Yu., Lobova G.A., Staro-stenko V.I. Estimation of the Oil-and-Gas Potential of Sedimenta-ry Depression in the Far East and West Siberia Based on Gravime-try and Geothermy Data. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 273–287.
12. Osipova E.N., Lobova G.A., Isaev V.I., Starostenko V.I. Neftega-zonosnost nizhnemelovykh rezervuarov Nyurolskoy megavpadi-ny [Petroleum potential of the Lower Cretaceous reservoirs of Ny-urolka megadepression]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Uni-versity*, 2015, vol. 326, no. 1, pp. 14–33.
13. Burshteyn L.M., Zhidkova L.V., Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N. Model katageneza organicheskogo veshchestva (na primere bazhenovskoy svity) [The model of katagenesis of organic matter (by the example of Bazhenov Formation)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 1070–1078.
14. Lobova G.A., Popov S.A., Fomin A.N. Lokalizatsiya prognoznykh resursov nefti yursko-melovykh neftegazonosnykh kompleksov Ust-Tymskoy megavpadiny [Probable oil resource localization for Jurassic and Cretaceous oil-and-gas complexes in Ust-Tym mega depression]. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2013, no. 2, pp. 36–40.
15. Tissot B.P. Preliminary Data on the Mechanisms and Kinetics of the Formation of Petroleum in Sediments. Computer Simulation of a Reaction Flowsheet. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2003, vol. 58, no. 2, pp. 183–202.
16. Popov S.A., Isaev V.I. Modelirovanie processov generacii i jemi-gracii uglevodorodov [Modeling of processes of generation and emigration of hydrocarbons]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Universit*, 2013, vol. 316, no. 1, pp. 104–110.
17. Kukkonen I.T., Golovanova I.V., Khachay Yu.V., Druzhinin V.S., Kosarev A.M., Scharov V.A. Low geothermal heat flow of the Urals fold belt – implication of low heat production, fluid cir-culation or paleoclimate? *Tectonophysics*, 1997, vol. 276, pp. 63–85.
18. Demezko D.Yu., Ryvkin D.G., Outkin V.I., Duchkov A.D., Balobaev V.T. Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data. *Climate of the Past*, 2007, vol. 3, pp. 559–563.
19. Kutas R. I. Geotermicheskie razrezy zemnoy kory i verkhney mantii Chernogo morya i ego severnogo obramleniya [The geo-thermal section of the Earth crust and of top mantle of the Black Sea and its northern frame]. *Geofizicheskiy zhurnal – Geophysical journal*, 2011, vol. 33, no. 6, pp. 50–67.
20. Golovanova I.V., Salmanova R.Yu., Tagirova Ch.D. Metodika rascheta glubinykh temperatur s uchetoм ispravlenykh na vli-yanie paleoklimata znacheny teplovogo potoka [Method for deep-temperature estimation with regard to the paleoclimate influence on the heat flow]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Ge-ophysics*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1426–1435.
21. Vogt C., Mottaghy D., Rath V., Marquart G., Dijkshoorn L., Wolf A., Clauser C. Vertikal variation in heat flow on the Kola Penin-sula: paleoclimate or fluid flow? *Geophysical Journal Internatio-nal*, 2014, vol. 199, pp. 829–843.
22. Isaev V.I., Rylova T.B., Gumerova A.A. Paleoklimat Zapadnoy Sibiri i realizatsiya generatsionnogo potentsiala neftematerin-skikh otlozheny [Paleoclimate of Western Siberia and implemen-tation of generative potential of oil source deposits]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 93–102.
23. Podgornykh L.V., Khutorskoy M.D., Gramberg I.S., Leonov Yu.G. Trekhmernaya geotermicheskaya model Karskogo shelfa i prognoz neftegazonosnosti [Three-dimensional geothermal model of the Karsk shelf and forecast of oil-and-gas content]. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2001, vol. 380, no. 2, pp.333–338.
24. Glaznev V.N., Kukkonen I.T., Raevsky A.B., Ekinen Ya. Novye dannye o teplovom potoke v tsentralnoy chasti Kolskogo poluo-strova [New data on a thermal stream in the central part of the Ko-la half-island]. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2004, vol. 396, no. 1, pp.1–3.
25. Duchkov A.D., Istomin V.E., Sokolova L.S. Geotermichesky met-od obnaruzheniya gazovykh gidratov v donnykh osadkakh akva-tory [A geothermal method for detecting gas hydrates in the bot-tom sediments of water basins]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 7, pp. 920–929.
26. Lopatin N.V. Kontseptsiya neftegazovykh generatsionno-akku-mulyatsionnykh sistem kak integriruyushchee nachalo v obosno-vanii poiskovo-razvedochnykh rabot [The concept of oil and gas generative and accumulative systems as the integrating begin-ning in justification of exploration]. *Geoinformatika*, 2006, no. 3, pp. 101–120.
27. Galushkin Yu.I., Sitar K.A., Kunitsina A.V. Chislennoe modeli-rovanie preobrazovaniya organicheskogo veshchestva os-adochnykh gornykh porod severo-vostochnogo shelfa Sakhalina [Numerical modeling of transformation of organic substance of sedimentary rocks of the northeast shelf of Sakhalin]. *Oceanolo-gy*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 521–531.
28. Isaev V.I., Lobova G.A., Osipova E.N. The oil and gas contents of the Lower Jurassic and Achimovka reservoirs of the Nyurol'ka megadepression. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1418–1428.
29. Sungurova O.G., Mazurov A.K., Isaev V.I. Resursoeffektivnaya strategiya poiskov zalezhey nefti v do-yurskom osnovanii Zapad-noy Sibiri [Resource efficient search strategies of oil deposits in the pre-Jurassic base of Western Siberia]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 147–154.
30. Kontorovich V.A. Seysmogeologicheskie kriterii neftegazonosno-sti zony kontakta paleozoyckikh i mezozoyckikh otlozheny Zapad-noy Sibiri (na primere Chuzikcko-Chizhapckoy zony neftegazona-kopleniya) [Petroleum potential of reservoirs at the paleozoic-mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (by the example of the chuzik-chizhapka regional oil-gas accumula-tion)]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysic*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 538–547.
31. Zapivalov N.P., Isaev G.D. Kriterii otsenki neftegazonosnosti pa-leozoyckikh otlozheny Zapadnoy Sibiri [Criteria of assessment of oil-and-gas content of Paleozoic deposits of Western Siberia]. *Bulletin of Tomsk state university*, 2010, vol. 341, pp. 226–232.
32. Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Kory vyverivaniya do-yur-skikh otlozheny Zapadno-Sibirskoy geosineklizy [Weathering rocks of pre-Jurassic rocks of Western-Siberian geosyncline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 77–81.
33. Nedolivko N.M., Ezhova A.V. Petrograficheskyy sostav i istoriya formirovaniya zony kontakta paleozoyckikh i mezozoyckikh ot-lozheny na Chkalovskom neftyanom mestorozhdenii (po dannym

- skvazhiny 26) [Petrographic composition and history of the formation of the Paleozoic and Mesozoic sediments on Chkalauski oil deposit (according to the well 26)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 36–43.
34. Lifanov V.A. Osobennosti geologicheskogo stroeniya i perspektivy neftegazonosnosti nizhneyurskikh bazalnykh gorizontov yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Features of geological structure and petroleum potential of the Lower Jurassic basal horizon southeast of Western Siberia]. *Puti realizatsii neftegazovogo i rudnogo potentsiala HMAO* [Realization of oil and gas and ore potential of Khanty Mansiysk autonomous region]. Khanty Mansiysk, Izdat-Naukservis, 2012. Vol. 1, pp. 252–257.
 35. Syngaevsky P.E., Khafizov S.F. Formatsiya kory vyvetrivaniya v osadochnom tsikle Zapadno-Sibirskogo basseyna [Weathering crust formation in the sedimentary cycle of the West-Siberian district]. *Geologiya nefti i gaza – Geology of oil and gas*, 1990, no. 11, pp. 22–30.
 36. Kontorovich V.A. Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary in West Siberia: seismogeological criteria (example of the Chuzik-Chizhapka regional oil-gas accumulation). *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, pp. 422–428.
 37. Isaev V.I., Lobova G.A., Korzhov Yu.V., Kuzina M.I., Kudryashova L.A., Syngurova O.G. *Strategiya i osnovy tekhnologii poiskov uglevodorodov v doyrskom osnovanii Zapadnoy Sibiri* [Strategy and basics technologies of searching hydrocarbons in Pre-Jurassic basement of Western Siberia]. Tomsk, TPU Publ., 2014. 112 p.
 38. Koshlyak V.A. *Granitoidnye kollektory nefti i gaza* [Granitoid collectors of oil and gas]. Ufa, Tau Publ., 2002. 242 p.
 39. Isaev V.I., Gulenok R.Yu., Isaeva O.S., Lobova G.A. Density Modeling of the Basement of Sedimentary Sequence and Prediction of Oil-Gas Accumulation: Evidence from South Sakhalin and West Siberia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 191–204.
 40. Koveshnikov A.E., Nedolivko N.M. Vtorichno-katageneticheskie preobrazovaniya doyrskikh porod zapadno-sibirskoy geosinklizi [Secondary catagenetic transformations of pre-Jurassic rocks of Western-Siberian geosyncline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 82–86.
 41. Akhmetov E.M., Kuldeev E.I., Istekova S.A. Petrofizicheskoe obosnovanie i metodika interpretatsii GIS v produktivnykh plastakh mestorozhdeniya Uzen (Kazakhstan) [Petrophysical justification and technique of interpretation of GSW in productive layers of Uzen field (Kazakhstan)]. *Promyslovaya geofizika v 21 veke. Tezisy dokladov* [Trade geophysics in the 21st century. Theses of reports]. Moscow, RSU of oil and gas of I.M. Gubkin, 2012. pp. 119–121.
 42. Isaev V.I., Nguen H.B. Cavitation in Oil-Gas Reservoirs of the Crystalline Basement from the Well Logging Data on the White Tiger Field in Vietnam. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2013, vol. 7, no. 4, pp. 237–246.

Received: 11 January 2015.

УДК 528.94; 581.5

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА НАЗЕМНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ТИПА ВЕРХНЕГО СЛОЯ ТОРФА СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫХ ОТРОГОВ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА ПО ДИСТАНЦИОННЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

Алексеева Мария Николаевна,

канд. геогр. наук, мл. науч. сотр. Института химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: amn@ipc.tsc.ru

Прейс Юлия Ивановна,

канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. геоинформационных технологий
Института мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск,
пр. Академический, 10/3. E-mail: preisyui@rambler.ru

Дюкарев Егор Анатольевич,

канд. физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. лаб. физики климатических систем
Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского
отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск,
пр. Академический, 10/3. E-mail: egor@imces.ru

Использование космических снимков для комплексного исследования природных объектов, в том числе для оценки современного ресурсного потенциала болот и скорости возобновления торфяных ресурсов, актуально в условиях труднодоступных и заболоченных территорий Западной Сибири. Структура болотных массивов хорошо отражается на космических снимках благодаря индикационным свойствам – текстуре и цвету однородных контуров болотных микроландшафтов. Космические снимки позволяют оценить современное состояние болотных экосистем и их нарушения в связи с антропогенным воздействием.

Цель работы: с использованием космических снимков составить карту наземного покрова южно-таежного ключевого участка «Бакчар–Икса». На основе составленной карты и данных полевых исследований провести геопространственный анализ структуры растительного покрова и верхнего слоя торфа.

Методы исследования. Тематическое картирование наземного покрова лесоболотной территории ключевого участка на основе дешифрирования космических снимков Landsat позволит определить площади, занимаемые различными типами болотных комплексов. Для дешифрирования космических снимков, составления карт и оценочных расчетов используется комплекс геоинформационных программ.

Результаты. Тематическая обработка космических снимков Landsat в системе ERDAS Imagine и формирование цифровых слоев в ArcGIS позволили наглядно картографически представить пространственную структуру наземного покрова на обширной территории ключевого участка «Бакчар–Икса», а также исследовать соответствие данных видовой принадлежности торфа поверхностного слоя и современного растительного покрова Иксинского болота. Проведенный сравнительный анализ выявил достаточно хорошее соответствие полученных при дешифрировании выделов болотной растительности и подстилающих видов торфа, за исключением верхового фускум торфа.

Ключевые слова:

Болотные комплексы, космические снимки, геоинформационные системы, растительный покров, торфяная залежь.

Введение

Использование космических снимков для комплексного исследования природных объектов актуально при исследовании труднодоступных и заболоченных территорий Западной Сибири. Устойчивая структура болотных массивов хорошо отражается на космических снимках, благодаря индикационным свойствам болотных микроландшафтов в изменении структуры изображения и текстуры в пределах однородных контуров [1, 2]. Исследование пространственной структуры природного многообразия микроландшафтов болотных массивов проводится по мультиспектральным спутниковым изображениям с применением методов экспертного дешифрирования [2–4].

Использование результатов наземных подспутниковых исследований значительно повышает точность дешифрирования космических снимков [5, 6]. Карты, составленные по результатам дистанционного зондирования, позволяют не только оценить площади лесов, болотных ландшафтов, сельскохозяйственных угодий, но и выявить повреждения лесных массивов, определить источники повреждений, выполнить анализ биологических характеристик растительности [7–10].

Ключевой участок (КУ) «Икса–Бакчар» (рис. 1) характеризует южно-таежные ландшафты Западно-Сибирской равнины. Располагается на слабодренированной и сильно заболоченной Васюганской равнине [11]. Территория КУ включает водос-

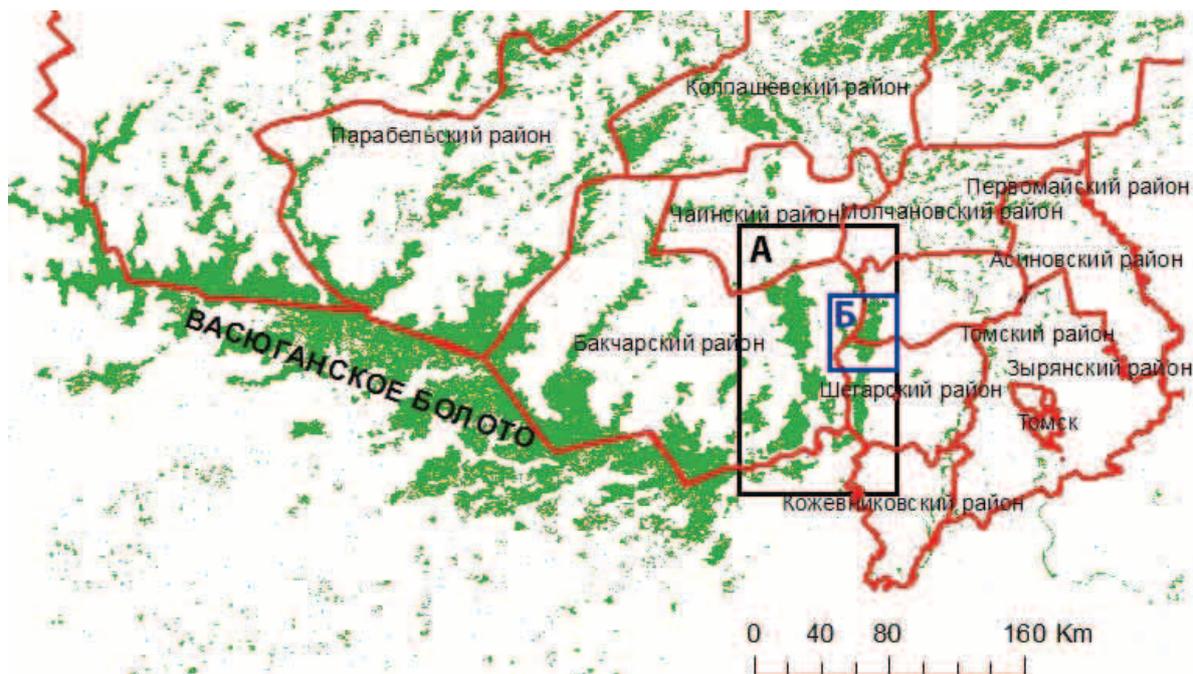


Рис. 1. А – Расположение ключевого участка «Икса–Бакчар». Б – участок Иксинского болота с зондированием торфа. Зеленым цветом показаны болота. Красным – границы районов Томской области

Fig. 1. А – Key area «Iksha–Bakchar». Б – Iksha bog area with peat sounding. The bogs are marked in green, the boundaries of Tomsk region districts are marked in red

боры притоков р. Чая – реки Икса, Бакчар, Тетеренка, Андарма, Парбиг, текущие в северо-восточном направлении. Строение междуречий во многом сходное, с асимметричной долиной: правый берег здесь несколько более крутой, чем левый, пологий, выделяется неширокая пойма. Большая часть междуречных пространств занята болотами. Между реками Бакчар и Икса располагается Бакчарский болотный массив, а между реками Икса и Шегарка – Иксинское болото. Также сильно заболочены левобережные террасы рек. За время формирования массивов болот, начавшегося на больших площадях 4,5–5 тыс. лет назад, торф перекрыл неровности поверхности, водоразделы приобрели слабо-выпуклый профиль, что создало условия для поверхностного стока вод с болот к периферии и привело к заболачиванию приболотных участков леса. Торфяные болота имеют среднюю мощность торфа 2–2,5 м, в первичных центрах заболачивания – 5–6 м.

Пространственная структура наземного покрова

Для классификации наземного покрова КУ «Икса–Бакчар» использовались космические снимки (КС) спутника Landsat 7. Сенсор ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) спутника Landsat-7 работает на орбите более 14 лет, и радиометрические характеристики прибора достаточно стабильные [12]. КС Landsat доступны бесплатно [13] через центр обработки данных Геологической службы США (U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Data Center) с помощью

веб-интерфейса Glovis [14]. Данные были получены в формате GeoTIFF в универсальной поперечной картографической проекции Меркатора (UTM) во Всемирной геодезической системе координат (WGS84). Каждое изображение состоит из шести спектральных каналов, ИК канала и панхроматического изображения. Шесть спектральных каналов с пространственным разрешением 28,5 м были использованы в дальнейшей работе. Из рассмотрения был исключен «тепловой» канал спутниковых снимков, полученный на длине волны 10,4–12,5 μm , поскольку пространственное разрешение в данном канале составляет 60 м.

Область КУ покрывают два спутниковых изображения, полученных в координатах PATH 149, ROW 20 и ROW 21 в системе координат Worldwide Reference System-2 (WRS-2). Два КС, датированных 13 июля 2007 г., были склеены в единую мозаику для обеспечения охвата территории всего КУ «Икса–Бакчар».

Для тематического анализа мозаики КС были сформированы обучающие выборки, на основе экспертных оценок с использованием полевых исследований различных ландшафтов в районе болотных массивов Икса и Бакчар. Формирование обучаемых эталонов и автоматическая классификация космических снимков Landsat проведены с использованием инструментальных средств системы ERDAS Imagine.

Обучающие выборки были сформированы для 26 типов наземного покрова, большинство из которых совпадает с типами, использованными в работе

Таблица. Классы наземного покрова КУ «Бакчар-Икса» и их площади (S)**Table.** Classes of ground cover of the key area «Bakchar-Iksa» and their areas (S)

| № | Класс/Class | Площадь, га Area, ha | Доля от S КУ, % Part of the key area, % | Доля от S основного класса, % Part of the main class area, % |
|---|---|----------------------------|---|--|
| Леса/Forests | | 755443 | 51,6 | |
| 1 | Темнохвойный/Dark coniferous | 354404 | 24,2 | 46,9 |
| 2 | Лиственный/Deciduous | 295378 | 20,2 | 39,1 |
| 3 | Смешанный/Mixed | 105661 | 7,2 | 14,0 |
| Болота водораздельные/Watershed bogs | | 437967 | 29,9 | |
| Залесенные/Wooded | | 218332 | 14,9 | |
| 4 | Рослый рям/Tall ryam | 80776 | 5,5 | 37,0 |
| 5 | Средний рям дренированный /Medium ryam drained | 7008 | 0,5 | 3,2 |
| 6 | Низкий рям дренированный/Low ryam drained | 11638 | 0,8 | 5,3 |
| 7 | Низкий рям/Low ryam | 65812 | 4,5 | 30,1 |
| 8 | Мелкомочажинно-рямовый комплекс/Small-hollow-ryam complex | 47033 | 3,2 | 21,5 |
| 9 | Среднемочажинно-рямовый комплекс/Medium-hollow-ryam complex | 6065 | 0,4 | 2,8 |
| Открытые/Open | | 219635 | 15,0 | |
| 10 | Грядово-мелкомочажинный комплекс/Ridge-small-hollow complex | 5578 | 0,4 | 2,5 |
| 11 | Грядово-среднемочажинный комплекс/Ridge-medium-hollow complex | 57248 | 3,9 | 26,1 |
| 12 | Грядово-крупномочажинный комплекс/Ridge-large-hollow complex | 28034 | 1,9 | 12,8 |
| 13 | Шейхцериево-сфагновая топь/Scheuchzeria-sphagnum fen | 37733 | 2,6 | 17,2 |
| 14 | Осоково-сфагновая топь/Sedge-sphagnum fen | 46348 | 3,2 | 21,1 |
| 15 | Сфагновые сплавины/Sphagnum floating fen | 39957 | 2,7 | 18,2 |
| 16 | Водные объекты/Water objects | 4738 | 0,3 | 2,2 |
| Болота террасовые/Terrace wetlands | | 108983 | 7,4 | |
| 17 | Заболоченный сосновый лес/Bog pine forest | 15259 | 1,0 | 14,0 |
| 18 | Согра/Swamp forest | 8354 | 0,6 | 7,7 |
| 19 | Сосново-разнотравно-моховое/Pine-herbs-moss | 15503 | 1,1 | 14,2 |
| 20 | Березово-разнотравно-гипновое/Birch-herbs-hypnum | 54133 | 3,7 | 49,7 |
| 21 | Ерниково-осоково-гипновое/Dwarf birch-sedge-hypnum | 15735 | 1,1 | 14,4 |
| Прочие земли/Other lands | | 162443 | 11,1 | |
| 22 | Поля, луга, пашни/Fields, meadow, croplands | 122855 | 8,4 | 75,6 |
| 23 | Пойма/Floodplain | 3956 | 0,3 | 2,4 |
| 24 | Населенные пункты/Settlements | 5450 | 0,4 | 3,4 |
| 25 | Мелиорированное болото залесенное/Drained wooded bog | 21667 | 1,5 | 13,3 |
| 26 | Мелиорированное болото открытое/Drained open bog | 8519 | 0,6 | 5,2 |
| Всего/Total | | 1464840 | | |

[15]. К исходному перечню добавлены типы «мелиорированное болото открытое» и «мелиорированное болото залесенное». Использованная классификация наземного покрова разработана специально для исследуемой территории. Классификация, безусловно, не охватывает всего разнообразия типов болотных систем Сибири и не является единственно возможной, но она оказалась удобной для картографического сопровождения исследования болот на территории КУ, включая пространственную оценку чистой первичной продукции, углеродного баланса болот и микроклиматических исследований.

Результаты автоматической классификации с обучением подвергались коррекции средствами ERDAS Imagine. Проведена генерализация полученной карты путем фильтрации результатов с выбором преобладающего класса в скользящем окне 3×3 пикселя.

Ранее [15] на исследуемой территории были выделены леса, разделенные на 3 класса по породному составу древостоев и степени гидроморфности. Выделено 9 типов болотных залесенных и 8 типов

открытых болотных систем, а также сельскохозяйственные угодья, водные и техногенные объекты. Результаты классификации наземного покрова КУ сходны с полученными ранее [15] для меньшей территории Бакчарского болота. Поэтому подробное описание выделов не приводится. Площади, занимаемые различными классами, и их доля от площади КУ и основного класса приведены в таблице. Около половины территории КУ занимают леса (51,6 %), часть из которых переувлажнена. Водораздельные болота представлены крупными болотными массивами открытого (15 %) и залесенного (14,9 %) типов. Болота вдоль речных долин составляют всего 7,4 % от площади КУ. 8,4 % занимают земли сельскохозяйственного назначения.

Пространственная структура болотных комплексов существенно отличается от структуры остальной территории (рис. 2). Водораздельные болотные массивы Бакчарского и Иксинского болот являются сложными системами с преобладанием комплексных фаций. В северной половине Иксинского болота представлен эксцентрический олиго-

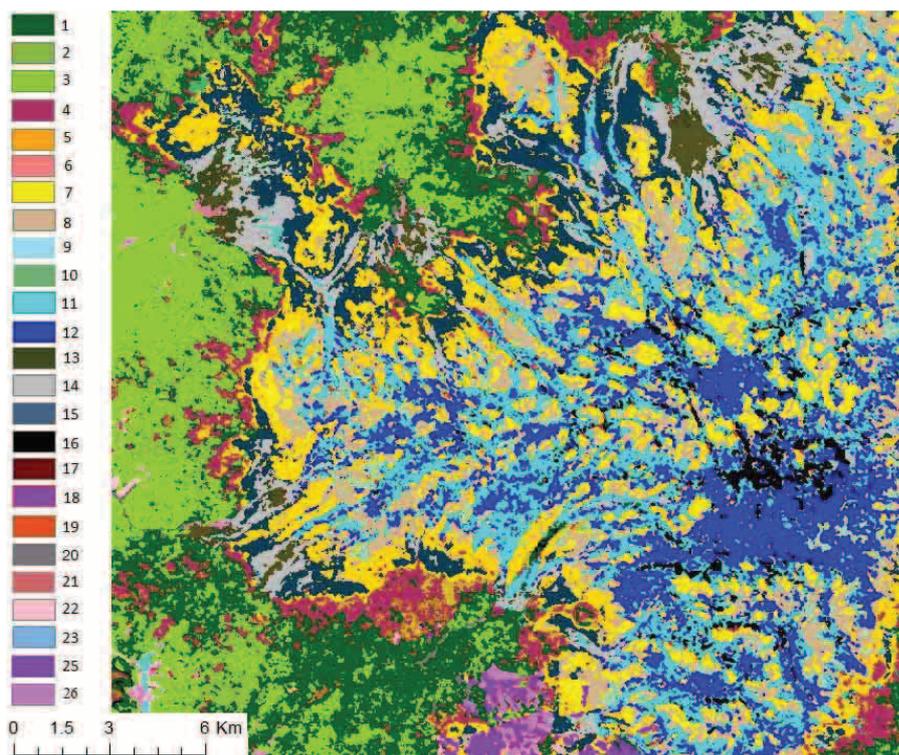


Рис. 2. Фрагмент карты наземного покрова, полученной в результате дешифрирования КС Landsat. Номера классов в легенде соответствуют обозначениям в таблице

Fig. 2. Map of ground cover based on decoded satellite imagery Landsat. The class number in explanatory text correspond to the numbers in Table

трофный болотный массив с сильнозаозеренным центральным плато и радиальной структурой склонов из чередующихся продольных полос рямов и грядово-мочажинно-озерных комплексов, а в южной половине на фоне сильнообводненных олиго- и мезоолиготрофных топей имеются многочисленные островки выпуклых верховиков и ло-

кальных заозеренных вершинных плато с ложбинами стока, ориентированными в разных направлениях и разного размера, с грядово-мочажинно-озерными и -озерковыми комплексами. Периферийные участки болота, как и все положительные элементы комплексов, заняты низкими и средними рямами, окрайки – рослыми рямами.

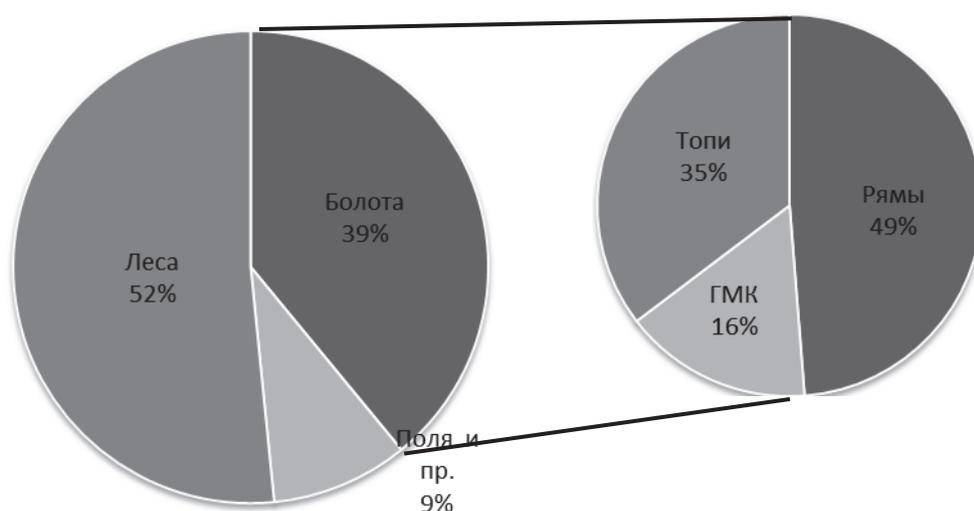


Рис. 3. Распределение обобщенных групп наземного покрова на территории КУ

Fig. 3. Distribution of the generic groups of the ground cover over the territory of the key area

Анализ взаимосвязей типов наземного покрова и видов торфа

Для дальнейшего анализа выделенные классы наземного покрова были обобщены в типичные группы, такие как леса (классы 1–3 таблица), открытые незаболоченные участки (поля, населенные пункты, пойма, водные объекты) и болотные выделы. Болота были разделены на три основные группы по характеру растительного покрова: облесенные болота (классы 4–9, 17, 19 и 25), грядово-мочажинные комплексы (ГМК) (классы 10–12) и топи (классы 13–15, 20, 21, 26). Доли распределения обобщенных классов от общей площади КУ представлены на рис. 3.

Проведенная генерализация классов необходима для решения конкретной задачи – сопоставления растительности и видов торфа. Изначальная достаточно подробная классификация наземного покрова проведена для надежного обнаружения однотипных, но существенно разных по спектральным характеристикам классов. Например, в класс облесенных болот объединены все типы рямовых сообществ, значительно различающихся между собой по составу и структуре древостоя, увлажнению поверхности и пр., что отражается в спектральных характеристиках обучающих выборок.

В среде ArcGIS проведен геопространственный анализ соответствия типов наземного покрова и

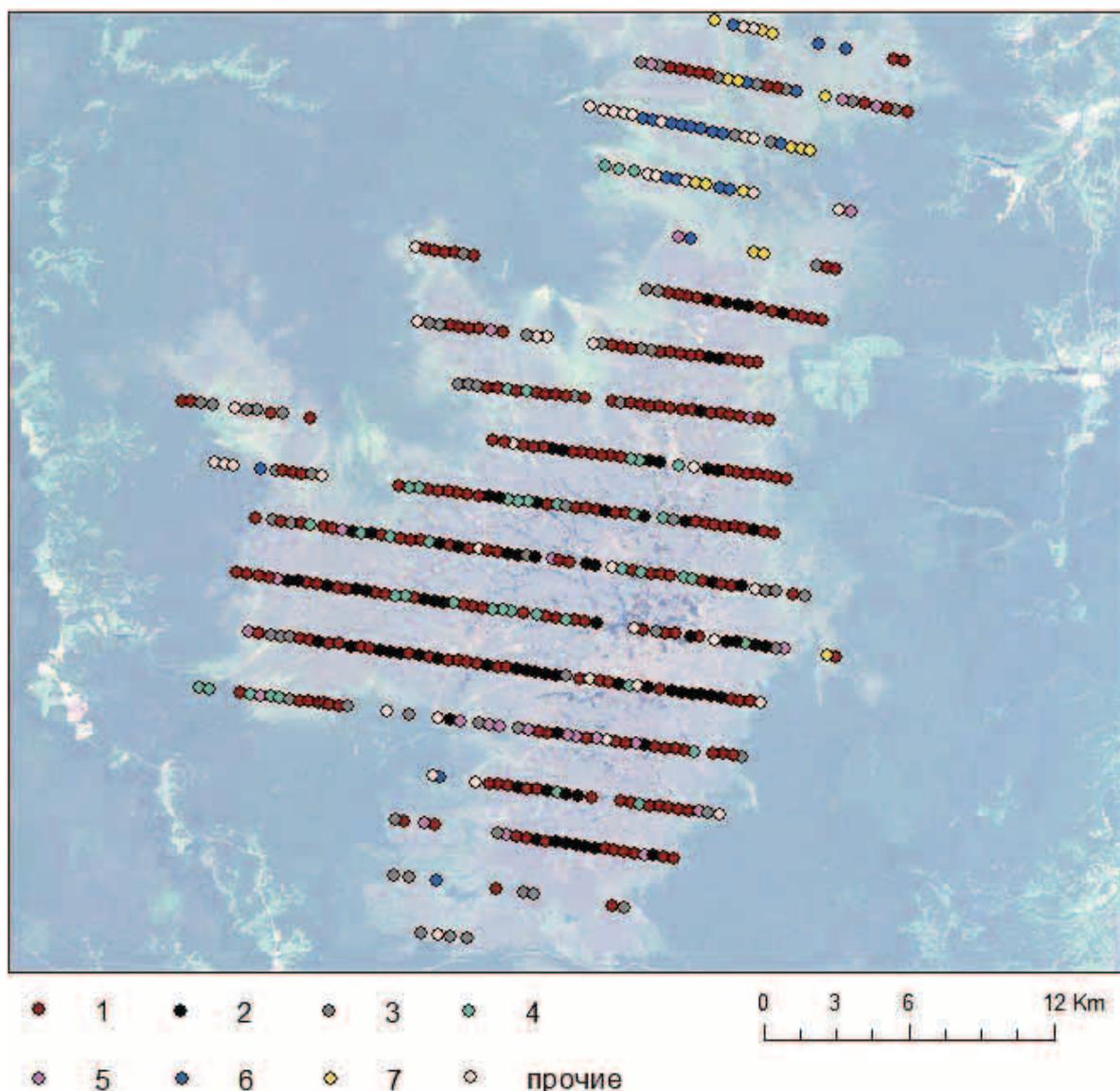


Рис. 4. Местоположение пунктов опробования торфяной залежи геологической разведки на Иксинском болоте. Подложка – КС Landsat. Виды торфа: 1 – фускум, 2 – комплексный верховой, 3 – магелланикум, 4 – сфагново-мочажинный, 5 – ангустифолиум, 6 – переходный осоково-сфагновый, 7 – переходный осоковый, 8 – прочие

Fig. 4. Points of sampling peat deposit of geological survey in Iksa bog. Substrate – satellite imagery Landsat. Types of peat: 1 – fuscum, 2 – complex raised bog, 3 – magellanicum, 4 – sphagnum-hollow, 5 – angustifolium, 6 – transition sedge-sphagnum, 7 – transition sedge, 8 – other

видов торфов, отлагаемых в верхних слоях залежи на территории ключевого участка Иксинского болота. База данных о видах торфа создана на основе ранее разработанной авторами автоматизированной системы оценки торфяного сырья по общетехническим свойствам торфа [16], в которую включены результаты фондовых материалов предварительной геологической разведки участка № 6 у с. Плотникова торфяного месторождения Васюганское [17].

База данных общих сведений о зондировании торфяной залежи содержит информацию о координатах нулевой границы месторождения, начала и конца профилей и пунктов отбора проб торфа в относительных величинах, полученных на основе плана месторождения, а база данных лабораторных анализов проб торфа – о типах и видах верхнего слоя торфа по 518 пунктам отбора. На рис. 4 приведено распределение пунктов опробования торфяной залежи на Иксинском болоте.

План геологической разведки торфяного месторождения Васюганское был географически привязан к топографическим картам масштаба 1:1000000 и 1:200000 и далее пространственно совмещен с КС в среде ArcGIS. Для векторизации точек по привязанному плану были отмечены начальные и конечные точки пунктов отбора образцов торфа и далее рассчитан шаг между остальными зондировочными точками (407 м по горизонтали), координаты которых были нанесены в ГИС. По ключевому коду номеров зондировочных точек в атрибутивной таблице векторного слоя плана точек пунктов отбора образцов торфа и аналогичного поля в БД видов

торфа [18], таблицы были сведены в одну в ГИС, что позволило наглядно отобразить векторный слой вида торфа в точках зондирования (рис. 4).

Анализ данных видовой принадлежности видов торфа поверхностного слоя торфяных залежей КУ Иксинского болота показал, что наиболее часто на территории встречается фускум торф (229 пунктов из 518), достаточно высокую встречаемость имеют комплексный верховой, магелланикум и сфагновый мочажинный (81, 62 и 42 пункта, соответственно), а также ангустифолиум и переходные осоково-сфагновый осоковый (25, 22 и 15 пунктов). Папиллозум, низинный осоковый, верховой пушицево-сфагновый и переходный сфагновый виды торфа найдены в небольшом числе пунктов опробования. Остальные виды торфа обнаружены в единичных пунктах (рис. 5).

Далее была рассчитана встречаемость видов торфа в процентах от числа пунктов опробования с каждым видом по обобщенным классам наземного покрова. Например, сфагновый мочажинный торф был обнаружен в 17 точках, соответствующих грядово-мочажинным комплексам, что составляет 10,8 % от общего числа пунктов (157) в которых присутствует этот вид торфа. Встречаемость менее 7 % можно считать незначительной.

Анализ показал, что все пункты отбора торфа в пределах обобщенного лесного класса приурочены к границе с болотом, то есть к контактной полосе заболоченных лесов или мелкозалежных облесенных участков болота. Здесь встречаются 11 видов разных типов торфа, но преимущественно верхового (53 %) и переходного (37 %) типов. Необходимо

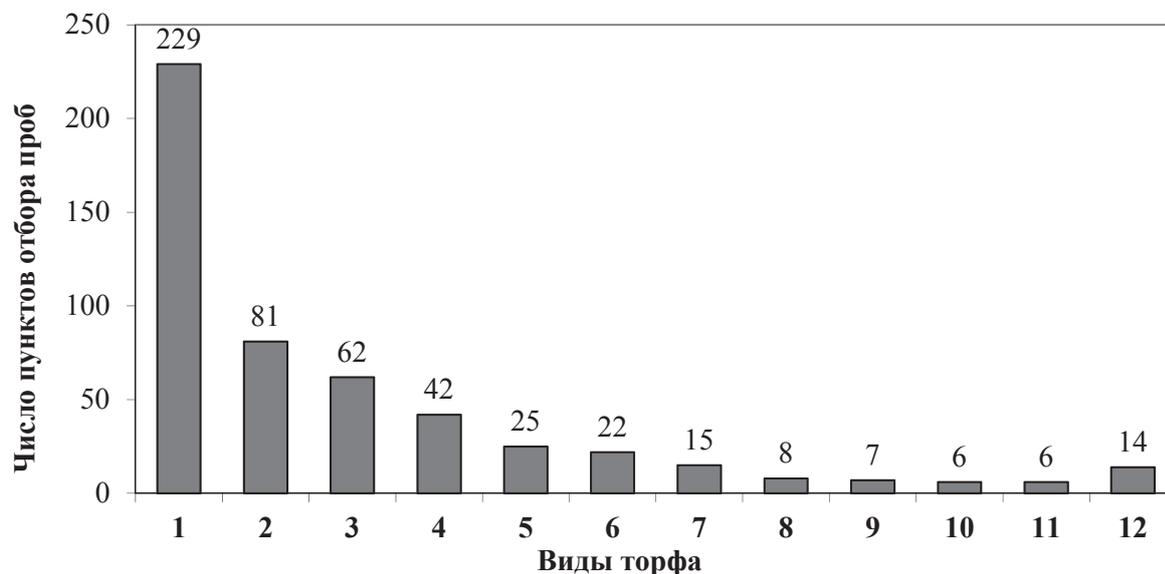


Рис. 5. Распределение количества пунктов отбора проб по видам торфа. Виды торфа: 1 – фускум, 2 – комплексный верховой, 3 – магелланикум, 4 – сфагново-мочажинный, 5 – ангустифолиум, 6 – переходный осоково-сфагновый, 7 – переходный осоковый, 8 – папиллозум, 9 – низинный осоковый, 10 – верховой пушицево-сфагновый, 11 – переходный сфагновый, 12 – прочие

Fig. 5. Distribution of points of sampling by peat types. Types of peat: 1 – fuscum, 2 – complex raised bog, 3 – magellanicum, 4 – sphagnum-hollow, 5 – angustifolium, 6 – transition sedge-sphagnum, 7 – transition sedge, 8 – papillosum, 9 – low-mire sedge, 10 – raised bog cottongrass-sphagnum, 11 – transition sphagnum, 12 – other

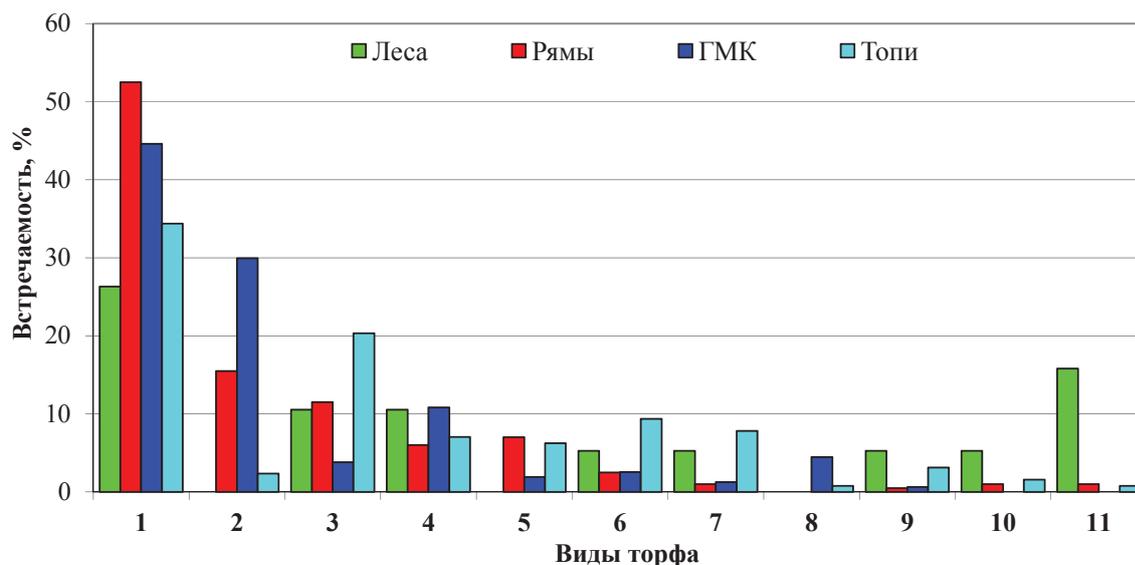


Рис. 6. Встречаемость видов торфа по обобщенным классам растительности. Обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Occurrence of peat types by the generic classes of vegetation. Symbols are the same as in Fig. 5

отметить, что на исследуемой территории распространения карбонатных глин и суглинков литогеннообусловленным типом заболачивания является эвтрофный, при котором отлагаются низинные торфа. На данной стадии развития болота несоответствие типов торфа богатству биофильными элементами подстилающих грунтов обусловлено, вероятнее всего, как изолирующим влиянием многолетнемерзлого водоупора в периоды похолоданий Малого Ледникового периода [19], так и воздействием кислых вод, стекающих с болота. Из верховых торфов часто встречаются: фускум, магелланикум, сфагновый мочажинный, пушицево-сфагновый, из переходных – сфагновый, осоково-сфагновый, осоковый. Только здесь выявлены переходные древесно-осоковый и шейхцерицево-сфагновый, низинный шейхцерицево-сфагновый. Наличие последних двух видов торфа, вероятнее всего, связано с погрешностью определения координат пунктов опробования, при котором произошло смещение из шейхцерицево-сфагновых топей, граничащих с суходольными лесами, или с погрешностью определения границ классов наземного покрова.

В классе **облесенных** болот наибольшее количество пунктов отбора (98,5 %) приурочено к олиготрофным рямовым (сосново-кустарничково-сфагновым) простым или комплексным выделам. Поэтому максимальную встречаемость (54 %) имеет фускум торф, отлагаемый доминантом этих сообществ [20]. Высокий суммарный процент (18,5 %) дают и типичные для рямов магелланикум и ангустифолиум торфа. Достаточно высокая встречаемость комплексного (15,5 %) и сфагново-мочажинного (6 %) торфов объясняется не только включением в эту группу комплексных растительных выделов, рямово-мелкомочажинного и мочажинно-рямового, но и значительной мелко-

контурностью рямовых выделов, извилистостью и размытостью их границ с более обводненными выделами. Этим же объясняется и встречаемость переходных осоково-сфагнового, осокового, сфагнового и низинного осокового, древесного и древесно-осокового торфов в периферийных рямах, граничащих с более высокотрофными или лесными выделами.

В **грядово-мочажинных** комплексах различного сложения преобладают верховые виды торфа (94 %), что отражает господство олиготрофных комплексов. Максимальную встречаемость имеет фускум, комплексный верховой и сфагновый мочажинный виды торфа. Именно в этих комплексных сообществах в связи с их высокой заозеренностью характерна максимальная встречаемость папиллозум торфа, отлагаемого на сплавинах. Необходимо отметить, что преобладают сильно обводненные комплексы, в которых гряды занимают не больше 5–10 % площади. В то же время встречаемость фускум торфа, типичного для гряд, составляет 44 %, отлагающегося на границах гряд комплексного верхового торфа – 30 %, а сфагново-мочажинного – лишь 11 %. Это также обусловлено закладкой пунктов отбора проб торфа при проведении геологоразведочных работ на наименее обводненных элементах комплексов. Переходные осоково-сфагновый, осоковый и низинный осоковый торфа встречаются единично в периферийных грядово-мочажинных комплексах.

В **топьяных** системах встречаются практически все верховые и переходные виды торфа, выявленные на исследуемом участке Иксинского болота, за исключением переходных шейхцерицево-сфагново- и древесно-осокового. Наиболее часто встречаются верховые торфа (74 %), что свидетельствует о господстве в настоящее время олиготрофных топей, а сочетание грядовых торфов: магелланикум,

фускум, (55 %) и топяных: ангустифолиум, сфагновый мочажинный, комплексный и папиллозум (16 %) – о мозаичном характере топей и наличии на них сфагновых кочек. Согласно [19], в периоды похолоданий Малого Ледникового периода на южнотаежных болотах, особенно на сильнообводненных сфагновых сплавинах, возникали многочисленные очаги многолетней мерзлоты и происходило интенсивное пучение мелких сфагновых бугров со *Sphagnum fuscum*. В последующие, более теплые, периоды климата мерзлота деградировала, бугорки, в связи с отсутствием мощного несущего каркаса из корней и стволиков сосенок и вересковых кустарничков, расплылись, и о былом их существовании свидетельствуют лишь округлые пятна *S. fuscum* с сильно угнетенными кустарничками и морошкой. Кроме этого, также высока вероятность закладки пунктов отбора преимущественно на наименее обводненных участках топей или кочках. По сравнению с облесенными и комплексными болотными выделами, в топях значительно более высокая встречаемость переходных торфов (23 %), представленных в основном осоково-сфагновым и осоковым, а также шейхцериевым, пушицево-сфагновым и сфагновым. Это связано с большей приуроченностью топей к периферийным, более мелкозалежным и, соответственно, более трофными участкам. При этом в классе сфагновые сплавины (15 в таблице) представлены и молодые топи, сформировавшиеся на месте облесенных окраев и минеральных островов, в которых еще не успел отложиться слой топяных мхов и верхний слой представлен переходными древесным, древесно-сфагновым и древесно-травяным торфами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландшафты болот Томской области / под ред. Н.С. Евсеевой. – Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2012. – 399 с.
2. Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data / O.N. Krankina, D. Pflugmacher, M. Friedl, W.B. Cohen, P. Nelson, A. Vaccini // *Biogeosciences*. – 2008. – V. 5. – P. 1809–1820.
3. Синюткина А.А. Классификация болотных геосистем Томской области // *Вестник Томского государственного университета*. – 2012. – № 357. – С. 192–195.
4. Базанов В.А., Березин А.Е. Кадастр болот районов нефтедобычи Томской области // *Вестник Томского государственного университета*. – 2006. – № 30. – С. 29–33.
5. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia / D. Pflugmacher, O. Krankina, W.B. Cohen, M.A. Friedl, D. Sulla-Menashe, R.E. Kennedy, P. Nelson, T.V. Loboda, T. Kuemmerle, E. Dyukarev, V. Elsakov, V.I. Kharuk // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – V. 115. – P. 3539–3553.
6. Hese S., Schmillius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia // *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformatics*. – 2009. – V. 11. – № 2. – P. 130–141.
7. Яценко И.Г., Алексеева М.Н., Сваровская Л.И. Геоинформационные технологии для анализа нефтяных загрязнений рек // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2014. – Т. 7. – С. 38–43.
8. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sensing of the Environment*. – 2011. – V. 115. – № 2. – P. 548–561.
9. A new land cover map of Northern Eurasia / S. Bartalev, A.S. Belward, D. Erchov, A.S. Isaev // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. – V. 24. – P. 1977–1982.
10. Геоинформационное обеспечение комплексного мониторинга БВБ / В.А. Крутиков, Ю.М. Полищук, Е.С. Козин, О.С. Токарева // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития* / под ред. чл.-корр. РАН М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 73–79.
11. Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / отв. ред. М.В. Кабанов – Новосибирск. Изд-во Сибирского отделения РАН, 2012. – 242 с.
12. Landsat-7 ETM+: 12 Years On-Orbit Reflective-Band Radiometric Performance / B.L. Markham, M.O. Haque, J.A. Barsi, E. Mijicijevic, D.L. Helder, K.J. Thome, D. Aaron, J.S. Czapla-Myers // *Geoscience and Remote Sensing*. – 2012. – V. 50. – № 5. – P. 2056–2062.
13. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat / M.A. Wulder, J.G. Masek, W.B. Cohen, T.R. Loveland, C.E. Woodcock // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – V. 122. – P. 2–10.

Заключение

Таким образом, проведенный сравнительный анализ выявил достаточно хорошее соответствие полученных при дешифрировании выделов болотной растительности и подстилающих их видов торфа. Завышение процента встречаемости грядовых торфов в комплексных и топяных выделах свидетельствует об их большой мозаичности и неполном соответствии верхнего слоя торфяной залежи современному наземному покрову, что обусловлено несоблюдением одного из требований методики геологической разведки – равномерной закладки пунктов отбора проб строго через 400 м. Следовательно, в таких болотных растительных выделах, имеющих комплексное строение и хорошо выраженную мозаичность, получить более объективные данные по стратиграфии залежи и соответствию верхнего слоя торфа современному растительному покрову возможно лишь при опробовании залежи преобладающего элемента комплексов или комплексными пунктам отбора.

Тематическая обработка космических снимков Landsat в системе ERDAS Imagine и формирование цифровых слоев в ArcGIS позволили наглядно картографически представить пространственную структуру наземного покрова на обширной территории КУ «Бакчар–Икса», а также исследовать соответствие данных видовой принадлежности торфа поверхностного слоя и современной растительности Иксинского болота. Проведенный сравнительный анализ выявил достаточно хорошее соответствие полученных при дешифрировании выделов болотной растительности и подстилающих видов торфа, за исключением верхового фускум торфа.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 13-05-98048-р_суб_а).

14. Landsat Satellite Archives // USGS EarthExplorer. 2012. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 01.12.2014).
15. Дюкарев Е.А., Пологова Н.Н., Головацкая Е.А. Технологии дистанционного зондирования для установления структуры лесоболотных комплексов ключевого участка «Бакчарский» // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия «Техника и технологии». – 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 334–345.
16. Буркатовский Б.А., Прейс Ю.И. Автоматизированная система оценка запасов торфяного сырья // Чтения памяти Ю.А. Львова: Сборник статей / под ред. Г.Ф. Плеханова. – Томск: Из-во НИИ Биологии и Биофизики при Томском гос. университете, 1995. – С. 79–82.
17. Геологический отчет о предварительной разведке месторождения «Васюганское» (участок № 6 у села Плотниково) Шегарского, Кривошеинского и Бакчарского района Томской области, 1989–1991 г. – Т. 3. – 345 с. – Т. 4. – 300 с. – Т. 5. – 287 с.
18. Алексеева М.Н., Прейс Ю.И. Формирование геоинформационной системы «Растительный покров и торфяная залежь Иксинского болота» // Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Тез. рос. конф. / под. ред. М.В. Кабанова. – Томск, 14–17 октября 2013. – Томск: Изд-во Аграф-Пресс, 2013. – С. 170–171.
19. Прейс Ю.И. Палеокриогенные процессы в торфяных отложениях юга лесной зоны Западной Сибири // Климатология и гляциология Сибири: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2012. – С. 226–227.
20. Классификация торфов и торфяных залежей Западной Сибири / Р.Г. Матухин, В.Г. Матухина, И.П. Васильев, Л.С. Михантьева, Г.И. Попова, В.Д. Марков, Л.А. Оспенникова / науч. ред. Н.Н. Уланов. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 90 с.

Поступила 15.12.2014 г.

DC 528.94; 581.5

SPATIAL STRUCTURE OF VEGETATION COVER AND TOP LAYER OF PEAT OF NORTHEASTERN SPURS OF THE GREAT VASYUGAN MIRE BY REMOTE AND GROUND DATA

Maria N. Alekseeva,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 4, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia.
E-mail: amn@ipc.tsc.ru

Yulia I. Preis,

Cand. Sc., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: preisyui@rambler.ru

Egor A. Dyukarev,

Cand. Sc., Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: egor@imces.ru

The use of satellite images for a comprehensive study of natural objects, including the assessment of the current resource potential of wetlands and speed of peat accumulation is relevant in the study of remote areas of wetlands in Western Siberia. Structure of bog complexes is well reflected in the satellite images due to their indicator properties – texture and color of contours of bog microlandscapes. Satellite images allow evaluating the current state of wetland ecosystems and their violations in connection with the anthropogenic impact.

The main aim of the study is to map the surface cover using satellite images for South-Taiga key «Bakchar-Iksa»; to carry out geospatial analysis of the structure of vegetation and the top layer of peat on the basis of the map data and ground surveys.

The methods used in the study. Thematic mapping of surface cover of forest-bog complexes at a key area based on satellite images Landsat will identify the areas occupied by different types of bog complexes. A complex of geo-information programs will be used for interpretation of satellite imagery, mapping and assessment calculations.

Results. Thematic processing of satellite images Landsat in the ERDAS Imagine system and compilation of digital layers in ArcGIS show clearly the spatial structure of vegetation over «Bakchar-Iksa» key area and allow investigating the compliance between modern vegetation and supplies types of near-surface peat layer at Iksinskoye bog. The comparative analysis revealed a good correspondence obtained for mapped bog vegetation and underlying peat types, except ombrotrophic fuscum peat type.

Key words:

Bog complexes, satellite imagery, geographic information systems, vegetation cover, peat deposit.

The research was financially supported by RFBR (Grant № 13–05–98048-p_cub_a).

REFERENCES

1. *Landshafty bolot Tomskoy oblasti* [Landscapes of bogs in Tomsk region] Ed. by N.S. Evseeva. Tomsk, Izdatelstvo nauchno-tekhnicheskoy literatury, 2012. 399 p.
2. Krankina O.N., Pflugmacher D., Friedl M., Cohen W.B., Nelson P., Baccini A. Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data. *Biogeosciences*, 2008, vol. 5, pp.1809–1820.
3. Sinyutkina A.A. Klassifikatsiya bolotnykh geosistem Tomskoy oblasti [Classification of bog systems of Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 357, pp. 192–195.
4. Bazanov V.A., Berezin A.E. Kadastr bolot rayonov nefte dobychi Tomskoy oblasti [Inventory of bogs of oil-producing areas in Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2006, no. 30, pp. 29–33.
5. Pflugmacher D., Krankina O., Cohen W.B., Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Kennedy R.E., Nelson P., Loboda T.V., Kuemmerle T., Dyukarev E., Elsakov V., Kharuk V.I. Comparison and assessment of coarse resolution land cover maps for Northern Eurasia. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, pp. 3539–3553.
6. Hese S., Schmillius C. High spatial resolution image object classification for terrestrial oil spill contamination mapping in West Siberia. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformatics*, 2009, vol. 11, no. 2, pp. 130–141.
7. Yashchenko I.G., Alekseeva M.N., Svarovskaya L.I. Geoinformatsionnye tekhnologii dlya analiza neftyanykh zagryazneniy rek [Geographic information technologies for analyzing oil pollution of rivers]. *Interesko Geo-Sibir*, 2014, vol. 7, pp. 38–43.
8. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia. *Remote Sensing of the Environment*, 2011, vol. 115, no. 2, pp. 548–561.
9. Bartalev S., Belward A.S., Erchov D., Isaev A.S. A new land cover map of Northern Eurasia. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, vol. 24, pp. 1977–1982.
10. Krutikov V.A., Polishchuk Yu.M., Kozin E.S., Tokareva O.S. Geoinformatsionnoe obespechenie kompleksnogo monitoringa BVB [Geoinformational support for integrated monitoring of BVB]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Mire. Current state and development processes]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, Institute of atmospheric optics SO RAN, 2002. pp.73–79.
11. *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bolshogo Vasyuganskogo bolota* [The study of natural and climatic processes in the Greater Vasyugan Mire]. Ed. by M.V. Kabanov. Novosibirsk, SB RAS Press, 2012. 242 p.
12. Markham B.L., Haque M.O., Barsi J.A., Micijevic E., Helder D.L., Thome K.J., Aaron D., Czapla-Myers J.S. Landsat-7 ETM+: 12 Years On-Orbit Reflective-Band Radiometric Performance. *Geoscience and Remote Sensing*, 2012, vol. 50, no. 5, pp. 2056–2062.
13. Wulder M.A., Masek J.G., Cohen W.B., Loveland T.R., Woodcock C.E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 122, pp. 2–10.
14. Landsat Satellite Archives. USGS EarthExplorer. 2012. Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 01.12.2014).
15. Dyukarev E.A., Pologova N.N., Golovatskaya E.A. Tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya dlya ustanovleniya struktury le-sobolotnykh kompleksov klyuchevogo uchastka «Bakcharskiy» [Remote sensing technology to determine the structure of forest bog complexes of key area «Bakcharsky»]. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Seriya «Tekhnika i tekhnologii»*, 2008, vol. 1, no. 4, pp. 334–345.
16. Burkatovskiy B.A., Preys Yu.I. Avtomatizirovannaya sistema otsenki zapasov torfyanogo syrya [Automated system for assessment of stocks of raw peat]. *Chteniya pamyati Yu.A. Lvova: Sbornik statey* [Proceedings of conference in honor of Yu.A. L'vov]. Ed. by G.F. Plekhanov. Tomsk, Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk University Publ., 1995. pp. 79–82.
17. Geologicheskii otchet o predvaritel'noy razvedke mestorozhdeniya «Vasyuganskoe» (uchastok № 5 u sela Plotnikovo) Shegarskogo, Krivosheinskogo i Bakcharskogo raiona Tomskoy oblasti, 1989–1991 [Geological report on the preliminary exploration of the deposit «Vasyugan» (plot number 6 near the village Plotnikovo) Shegarsky, Krivosheinskiy and Bakcharsky districts of Tomsk region]. vol. 3. 345 p., vol. 4. 300 p., vol. 5. 287 p.
18. Alekseeva M.N., Preis Yu.I. Formirovanie geoinformatsionnoy sistemy «Rastitelny pokrov i torfyanaya zalez Iksinskogo bolota» [Development of geoinformation system «vegetation cover and peat deposit of Iksa bog»]. *Desyatye sibirskoe soveshchanie po klimato-ekologicheskomu monitoringu. Tezisy rossiyskoy konferentsii* [Tenth Siberian meeting on climatic-ecological monitoring. Book of abstract of Russian conference.]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, 14–17 October 2013. Tomsk, Agraf-Press, 2013. pp. 170–171.
19. Preis Yu.I. Paleokriogennye protsessy v torfyanyykh otlozheniyakh yuga lesnoy zony Zapadnoy Sibiri [Paleocryogenic processes in peat sediments of southern forest zone of Western Siberia]. *Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Klimatologiya i glyatsiologiya Sibiri»* [Proc. Int. Scient. and Pract. Conf. Climatology and glaciology in Siberia]. Tomsk, 2012. pp. 226–227.
20. Matukhin R.G., Matukhina V.G., Vasilev I.P., Mikhanteva L.S., Popova G.I., Markov V.D., Ospennikova L.A. *Klassifikatsiya torfov i torfyanyykh zalegey Zapadnoy Sibiri* [Classification of peats and peat deposits of Western Siberia]. Ed. by N.N. Ulanov. Novosibirsk, SB RAN Publ., 2000. 90 p.

Received: 15 December 2014.

УДК 66.092.094.25.097

ГИДРОДЕСУЛЬФИРОВАНИЕ ДИБЕНЗОТИОФЕНА В ПРИСУТСТВИИ МАССИВНЫХ СУЛЬФИДНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ. МЕХАНИЗМ РЕАКЦИЙ

Акимов Аким Семенович,

аспирант, инженер-исследователь лаборатории каталитической переработки легких углеводородов Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: zerobox70@mail.ru

Морозов Максим Александрович,

аспирант, инженер-исследователь лаборатории каталитической переработки легких углеводородов Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: fr0stm4n@yandex.ru

Федуцак Таисия Александровна,

канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории каталитической переработки легких углеводородов Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: taina@ipc.tsc.ru

Уймин Михаил Александрович,

канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией прикладного магнетизма Института физики металлов Уро РАН, Россия, 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18. E-mail: uimin@imp.uran.ru

Петренко Татьяна Васильевна,

канд. хим. наук, науч. сотр. лаборатории физико-химических методов анализа Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: unicon@ipc.tsc.ru

Восмериков Александр Владимирович,

д-р хим. наук, заведующий лабораторией каталитической переработки легких углеводородов Института химии нефти СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 4. E-mail: pika@ipc.tsc.ru

Журавков Сергей Петрович,

канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории № 12 Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: zhursp@yandex.ru

Щеголева Нина Никифоровна,

науч. сотр. лаборатории ферромагнитных сплавов Института физики металлов Уро РАН, Россия, 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18. E-mail: Schegoleva@imp.uran.ru

Важнейшая проблема современной нефтепереработки связана с повышением эффективности гидрогенизационных процессов для получения высококачественных топливных дистиллятов. На сегодня катализаторы гидропереработки продолжают занимать лидирующее место среди прочих каталитических систем. В ходе эксплуатации традиционных нанесенных катализаторов тяжелые компоненты нефтяных дисперсных систем с высокой молекулярной массой осаждаются на поверхности гранул носителя, блокируя рабочую поверхность пор. Использование мезопористых носителей со сравнительно высоким размером пор далеко не всегда оказывается эффективным, поэтому ежегодное возрастание удельного веса публикаций, касающихся массивных (без носителя) сульфидных катализаторов гидрогенолиза, отражает изменения в ориентации исследований. Актуальность выполненной работы состоит в острой необходимости разработки новых методов и подходов к синтезу оригинальных отечественных массивных сульфидных каталитических систем, обладающих высокой степенью активности и эффективности в процессах гидроочистки нефтяных топливных фракций, приготовление которых основано на использовании энергосберегающих и высокоэкологических подходов.

Цель работы: синтезировать твердофазным способом в одну стадию двухкомпонентные массивные сульфидные катализаторы, исследовать их активность в модельной реакции гидрогенолиза дибензотиофена, определить состав продуктов и наиболее вероятный механизм протекания реакции.

Методы исследования: метод просвечивающей электронной микроскопии, УФ-спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, метод хромато-масс-спектрометрии.

Результаты. Впервые в одну стадию получены высокоактивные двухкомпонентные катализаторы путем непосредственного механохимического сочетания крупнодисперсных порошков кобальта (никеля) с дисульфидом молибдена как прекурсоров промотора и активного компонента. Выполнены систематические исследования по определению влияния соотношения исходных реагентов, времени их механообработки на активность гидродесульфирования дибензотиофена. Выявлены оптимальные условия приготовления Ni- и Co-содержащих систем, которые обеспечивают ультранизкий уровень серы в модельной реакции гидрогенолиза дибензотиофена (1–3 ppm). Определен состав продуктов реакции; показано, что реакции гидрогенолиза дибензотиофена протекают параллельно по крекирующему и гидрирующему маршрутам.

Ключевые слова:

Массивные сульфидные катализаторы, крупнодисперсные порошки, механоактивация, модельная реакция гидрогенолиза.

Катализаторы гидрогенизационных процессов широко используются в процессах получения высококачественных топливных дистиллятов и занимают лидирующее место среди прочих каталитических систем. В литературных источниках все чаще обращается внимание на то, что в процессе эксплуатации нанесенных катализаторов компоненты тяжелых нефтяных остатков с высокой молекулярной массой осаждаются на поверхности их гранул, блокируя рабочую поверхность пор.

Разработке высокодисперсных массивных сульфидных каталитических систем (без носителя), в особенности используемых для гидропереработки тяжелых нефтяных фракций (выкипающих свыше 360 °С), посвящено значительное количество исследований. Например, для высокодисперсных полиметаллических (Ni-Mo, Co-Mo или Ni-Mo-W) катализаторов серии Nebula, полученных методом соосаждения показана высокая эффективность во всех гидропроцессах (гидрогенизация, гидродесульфурезация, гидроденитрогенизация, гидродеметаллизация, гидродеароматизация, гидроизомеризация, гидродепарафинизация, гидрокрекинг) [1]. Причина высокой каталитической активности и селективности массивных Ni-Mo-W сульфидных катализаторов связана, как было установлено, со структурными особенностями строения их предшественников, которые являются слоистыми гидротальцитоподобными соединениями (или их никель-молибдатными производными), в которых молибдатные анионы располагаются в межслоевых галереях, образованных Ni(Co)-гидроксидными плоскостями [2].

Привлечение метода механоактивации к процедуре приготовления массивных каталитических систем гидроочистки имеет ряд преимуществ, так как позволяет сократить количество стадий, длительность процесса, исключить использование водных растворов реагентов и органических растворителей. Например, взаимодействие кристаллогидратов основных и кислых солей (как прекурсоров активного компонента), в условиях механохимического сочетания, приводит к протеканию твердофазных реакций с выделением воды [3, 4]. Механическое и гидродинамическое воздействие на реакционную смесь сопровождается увеличением количества точечных контактов, способствует их постоянному обновлению, а также генерированию дефектов, их размножению и миграции по всему объему реакционной смеси. Размер частиц

после механохимической активации, как правило, составляет 1,0–10 мкм; они характеризуются слоистой гидротальцитоподобной структурой [5].

Высокоактивный массивный катализатор гидропереработки нефтяных фракций, описанный в работе [6], представляет собой механоактивированную смесь микронных порошков трех–четырех металлов, которые в течение всего процесса приготовления находятся в твердом состоянии в аппарате механического или гидродинамического действия. Затем продукт выщелачивают, окисляют, сушат и сульфидируют [6].

Следует отметить, что все описанные в литературе методы и подходы к приготовлению массивных сульфидных каталитических систем требуют перевода солей-предшественников в собственно активный компонент (сульфид) посредством реализации цепочки химических превращений: смесь солей → смесь оксидов → сульфиды [7–18].

В данном исследовании в одну стадию методом механоактивации были приготовлены двухкомпонентные массивные сульфидные катализаторы, исследована их активность в модельной реакции гидрогенолиза дибензотиофена, определен состав продуктов и сделано заключение о вероятном механизме протекания реакции.

Экспериментальная часть

В качестве исходных реагентов использовали вещества, которые фактически являются размерными прекурсорами компонентов активной каталитической фазы в MoCo (Ni)-S сульфидных катализаторах. Это – коммерческие крупнодисперсные порошки дисульфида молибдена (содержание основного вещества 99,72 %), кобальта (ПК-1у, средний размером 70 мкм) и никеля (ПНЭ-1), которые подвергали механоактивации (МА) в вертикальной вибрационной мельнице при соотношении масс порошка и шаров 1:60. Весовые соотношения промотора Co (Ni) и активного компонента составляли 1:7 и 1:10, время механообработки составляло 4 и 8 ч. Изменение дисперсности композитов до и после механоактивации оценивали с привлечением метода просвечивающей электронной микроскопии (Philips CM-30).

Активность приготовленных массивных сульфидных каталитических систем оценивали в ходе модельной реакции гидрогенолиза дибензотиофена (ДБТ), который является, согласно литературным данным, наиболее удачной химической мо-

делью, отражающей поведение наиболее устойчивых сернистых структур, присутствующих в дизельной фракции. Собственную активность катализаторов оценивали по уровню остаточной серы (анализатор серы OXFORD Instruments Lab – X 3500 SCL) в конечных гидрогенизатах, принимая во внимание значения констант скорости превращения ДБТ.

Эксперименты по тестированию катализаторов выполнены в автоклаве типа «AUTOCLAVE ENGINEERS» с объёмом реактора 100 мл, при давлении 3,4 МПа, температуре 340 °С ($S_{исх.} = 500 \text{ ppm}$). Состав продуктов в гидродесульфуризатах идентифицировали по результатам хромато-масс-спектрометрического анализа «ГХ/МС» метода с использованием магнитного хроматомасс-спектрометра DFS фирмы «Thermo Scientific», Германия. Константы скорости гидрогенолиза ДБТ определяли исходя из предположения о псевдопервом порядке превращения ДБТ: $C_{ДБТ} = C_{ДБТ}^0 \cdot e^{-kt}$. Из тангенса угла наклона зависимости $\ln(C_{ДБТ}^0/C_{ДБТ})$ от t получали соответствующие значения констант скорости. Пробы из реактора отбирали через 0,5; 1; 2; 3; 4; 6 и 7 ч.

Обсуждение результатов

В предыдущих работах, при исследовании активности 4-х и 3-х-компонентных каталитических систем нами был обнаружен дефицит намагниченности для конечных продуктов МА, по сравнению с исходной смесью реагентов [19–22]. Причем для Co-систем он составил 30 %, а для Ni-содержащих композитов – 60 %. Возникающий дефицит намагниченности по нашему мнению обусловлен топочимической реакцией пересульфидирования, которая реализуется в условиях твердофазного сочетания реагентов, когда часть ферромагнитного металла переходит в немагнитное сульфидное соединение, уменьшая общую намагниченность смеси. Это, в свою очередь, неизбежно сопровождается образованием вакансий в серной подрешетке молибдена.

Аналогичные тенденции наблюдались и в данной работе, в процессе приготовления двухкомпонентных систем (рис. 1). На рис. 1, 2 отражено влияние механообработки на диспергирование смеси крупных порошков дисульфида молибдена и кобальта (никеля).

На ПЭМ-снимках видно, что в ходе МА длинные мягкие слоистые кристаллы MoS_2 (рис. 2) образуют нанокристаллитные изогнутые пачки MoS_2 , межплоскостные расстояния в них остаются неизменными и составляют 0,61 нм (рис. 3, 4). Мы не смогли увидеть на снимках частиц кобальта, возможно, из-за малой их объемной доли и предположительно высокой дисперсности. Однако, судя по виду кривых намагничивания в больших полях (данные не приводятся), а именно отсутствия заметного наклона в полях больше 15 кЭ, частицы кобальта должны быть не меньше 5–10 нм.

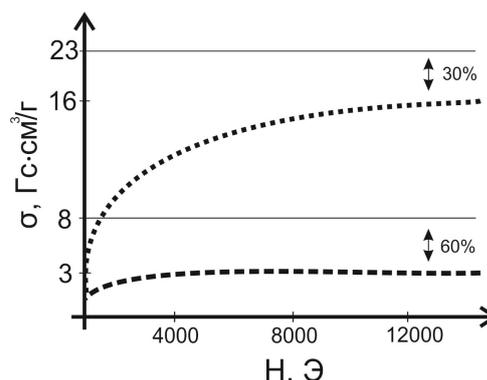


Рис. 1. Изменение намагниченности в ходе механоактивации смесей реагентов Co-MoS_2 (кривая 1; соотношение 1:7) и Ni-MoS_2 (кривая 2; соотношение 1:7). Прямые линии на графике соответствуют расчетному уровню намагниченности насыщения для исходных смесей с кобальтом

Fig. 1. Change of magnetization during mechanic activation of agent mix Co-MoS_2 (curve 1; ratio 1:7) and Ni-MoS_2 (curve 2; ratio 1:7). Straight lines correspond to the designed saturation magnetization level for base mix with cobalt

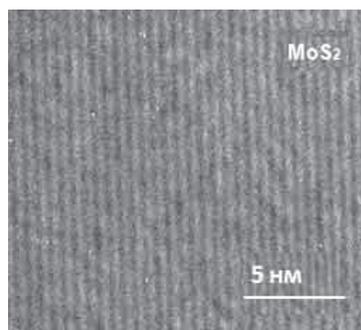


Рис. 2. ПЭМ-снимок исходного MoS_2

Fig. 2. TEM-image of a base MoS_2

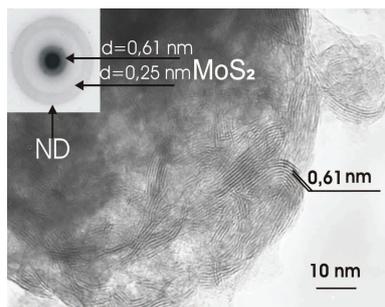


Рис. 3. ПЭМ-снимок каталитической системы состава $\text{Co:MoS}_2=1:7$ после 6 ч МА

Fig. 3. TEM-image of $\text{Co:MoS}_2=1:7$ catalytic system six hours after mechanical activation

В литературных источниках [1–10] описаны различные варианты превращения ДБТ в условиях реакции гидрогенолиза. Общим в них является рассмотрение возможности прямого разрыва связи C–S, что сопровождается образованием бифенила (БФ) и отражает крекирующий маршрут реакции (рис. 5, направление 1). Реперным при-

наком гидрирующего маршрута является (рис. 5, направление 2) присутствие в гидродесульфуризаторах циклогексилбензола (ЦГБ) и тетрагидродибензотиофена (ТГДБТ).

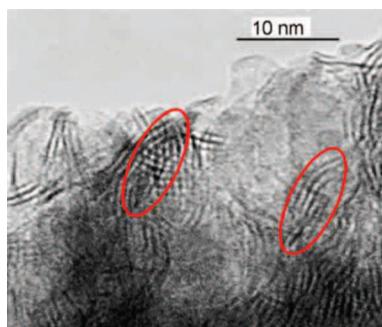


Рис. 4. ПЭМ-снимок каталитической системы состава $Co:MoS_2=1:7$ после 8 ч МА

Fig. 4. TEM-image of $Co:MoS_2=1:7$ catalytic system eight hours after mechanical activation

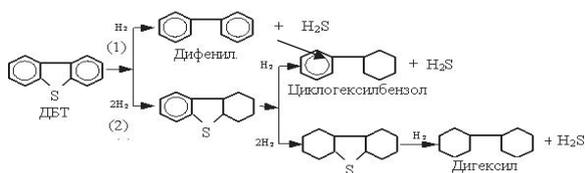


Рис. 5. Схема реакции гидродесульфирования дибензотиофена

Fig. 5. Scheme of dibenzothiophene hydrodesulfurization

В соответствии с результатами, приведенными в табл. 1, наибольшую активность в ряду исследованных $Co+MoS_2$ каталитических систем проявляют композиты состава 1:7 и 1:10 (АК-25 и АК-47), полученные при времени МА=8 часов, для которых содержание $S_{от}$ составляет 25 и 26 ppm соответственно. Значения констант скорости для указанных образцов близки, и составляют 0,68 и 0,60 $ч^{-1}$. Нужно отметить, что весовое соотношение компонентов 1:7 соответствует атомному соотношению промотор: $MoS_2=1:2$, что, согласно литературным данным, является оптимальным для нанесенных сульфидных каталитических систем.

Вместе с тем следует отметить, что оптимальным соотношением для катализаторов, синтезируемых в условиях механообработки [2], считается соотношение 1:1,4. Сопоставление экспериментальных результатов для систем $Co+MoS_2=1:7$, приготовленных при временах механообработки 4 и 8 ч (АК-65 и АК-25, табл. 1), обнаруживает более высокое значение константы скорости гидрогенолиза ДБТ (0,88 $ч^{-1}$) для катализатора АК-65. Поскольку доля ЦГБ в продуктах выше, чем БФ (в конце реакции значения близки, табл. 1), правомерно предполагать более высокую гидрирующую способность катализатора АК-65 по сравнению с катализатором АК-25.

Иными словами, реакция превращения ДБТ в исследованных условиях протекает по двум маршрутам. Гидрирующий маршрут реализуется через

стадию образования ТГДБТ, который присутствует в продуктах реакции (табл. 1). Согласно литературным данным [15], для нанесенных катализаторов константа скорости превращения ТГДБТ в ЦГБ на порядок выше таковой для БФ, что, в свою очередь, и обуславливает более высокое значение суммарной константы скорости для катализатора АК-65. Несколько более высокое значение остаточной серы в гидродесульфуризаторе можно объяснить направлением реакции превращения ТГДБТ не в направлении ЦГБ, не содержащего в структуре молекулы серы, а в сторону серосодержащего продукта (схема на рис. 5) небензотиофенового ряда. Поскольку при оценке каталитической активности каталитических систем гидроочистки нефтяных фракций определяющим критерием является глубина гидрообессеривания, для Co -содержащих катализаторов оптимальным временем механохимического сочетания с MoS_2 являются 8 ч при соотношении реагентов 1:7, когда обеспечивается $S_{от}=25$ ppm.

Таблица 1. Активность катализаторов $Co+MoS_2$ модельной реакции гидродесульфирования ДБТ. Состав продуктов реакции

Table 1. Activity of $Co+MoS_2$ catalysts in the model reaction of dibenzothiophene hydrodesulfurization. Composition of the reaction products

| Каталитическая система Catalytic system | Время, ч | | $k, ч^{-1}$ | S, ppm | Состав продуктов по данным ХМСА, отн. ед. Composition of products by the GSMS, arb. units | | |
|--|-----------------------------|-------------------------|-------------|----------|--|--------------------------------|---|
| | МА Mechanical activation | Отбора проб Sampling | | | БФ Biphenyl (BP) | ЦГБ Cyclohexylbenzene (CHB) | ТГДБТ Tetrahydrodibenzothiophene (THDBT) |
| АК-65 $Co+MoS_2$ 1 7 | 4 | 1 | 0,88 | 31 | 41,5 | 30,94 | 27,56 |
| | | 3 | | | 49,54 | 50,46 | Отс. |
| | | 4 | | | 44,79 | 55,21 | |
| | | 6 | | | 52,62 | 47,38 | |
| | | 7 | | | 51,58 | 48,42 | |
| АК-56 $Co+MoS_2$ 1 10 | 4 | 0,5 | 1,6 | 53 | 61,81 | 34,72 | 3,47 |
| | | 1 | | | 79,59 | 19,82 | 0,59 |
| | | 3 | | | 76,2 | 23,8 | Отс. |
| | | 6 | | | 68,07 | 31,93 | |
| 7 | 78,61 | 21,39 | | | | | |
| АК-25 $Co+MoS_2$ 1 7 | 8 | 1 | 0,68 | 25 | 74,92 | 12,70 | 12,38 |
| | | 2 | | | 76,65 | 14,97 | 8,38 |
| | | 3 | | | 80,31 | 16,50 | 3,19 |
| | | 4 | | | 78,59 | 19,87 | 1,54 |
| | | 5 | | | 77,16 | 19,67 | 3,17 |
| | | 6 | | | 77,87 | 22,13 | Отс. |
| | | 7 | | | 77,21 | 22,79 | |
| АК-47 $Co+MoS_2$ 1 10 | 8 | 0,5 | 0,60 | 26 | 82,1 | Отс. | 17,9 |
| | | 2 | | | 83,39 | 11,19 | 5,43 |
| | | 3 | | | 88,42 | 11,58 | Отс. |
| | | 4 | | | 90,81 | 9,19 | |
| | | 6 | | | 90,1 | 9,9 | |
| 7 | 86,3 | 13,7 | | | | | |

Таблица 2. Активность катализаторов Ni+MoS₂ модельной реакции гидродесульфирования ДБТ. Состав продуктов реакции

Table 2. Activity of Ni+MoS₂ catalysts in the model reaction of dibenzothiophene hydrodesulfurization. Composition of the reaction products

| Каталитическая система Catalytic system | Время, ч | | k, ч ⁻¹ | S, ppm | Состав продуктов по данным ХМС, отн.ед. Composition of products by the GSMS, arb. units | | |
|--|---------------------------|-------------------------|--------------------|--------|--|--------------------------------|--|
| | МА Mechanical activity | Отбора проб Sampling | | | БФ Biphenyl (BP) | ЦГБ Cyclohexylbenzene (CHB) | ТГДБТ Tetrahydrodibenzotiofен (THDBT) |
| АК-57 Ni+MoS ₂ 1 7 | 4 | 1 | 0,62 | 30 | 98,61 | 1,34 | 0,05 |
| | | 2 | | | 82,69 | 16,87 | 0,43 |
| | | 4 | | | 81,04 | 18,6 | 0,36 |
| | | 7 | | | 74,30 | 25,70 | Отс. |
| | | 4 | | | 78,59 | 19,87 | 1,54 |
| | | 5 | | | 77,16 | 19,67 | 3,17 |
| | | 6 | | | 77,87 | 22,13 | Отс. |
| АК-49 Ni+MoS ₂ 1 7 МА=8 ч | 8 | 0,5 | 0,29 | 87 | 47,76 | 21,39 | 30,84 |
| | | 1 | | | 41,15 | 24,13 | 34,72 |
| | | 3 | | | 50,05 | 36,75 | 13,21 |
| | | 4 | | | 52,04 | 42,66 | 5,31 |
| | | 6 | | | 50,41 | 45,91 | 3,68 |
| АК-58 Ni+MoS ₂ 1 10 | 4 | 2 | 0,6 | 15 | 50,29 | 49,71 | Отс. |
| | | 4 | | | 30,96 | 69,04 | |
| | | 7 | | | 30,7 | 69,3 | |
| АК-50 Ni+MoS ₂ 1 10 МА=8 ч | 8 | 0,5 | 0,25 | 117 | 94,39 | 5,04 | 0,57 |
| | | 2 | | | 91,94 | 7,41 | 0,65 |
| | | 3 | | | 92,17 | 7,47 | 0,36 |
| | | 4 | | | 84,84 | 14,67 | 0,48 |
| | | 7 | | | 74,54 | 24,98 | 0,48 |

Чрезвычайно интересным было проследить влияние химического характера промотора на ак-

тивность двухкомпонентных каталитических систем (табл. 2), что было продемонстрировано заменой Со-промотора на Ni-промотор (при их различных соотношениях).

На катализаторе состава Ni+MoS₂=1:10 остаточное содержание серы составило 15 ppm ($k=0,60 \text{ ч}^{-1}$) при времени МА 4 ч (АК-58, табл. 2). Примечательно, что состав продуктов при этом представлен только БФ и ЦГБ (без ТГДБТ). Тем не менее, результаты ХМСА отражают параллельные маршруты протекания реакции – прямой (крекирующий), через разрыв С–S связи, и гидрирующий, предваряющий разрыв той же связи гидрированием ароматических колец в ДБТ. Факт отсутствия в реакционной смеси ТГДБТ свидетельствует о высокой скорости его превращения на катализаторе АК-58; результат согласуется с литературными данными [5, 15], относительно высокой гидрирующей способности Ni-содержащих нанесенных каталитических систем. Вместе с тем повышение времени механообработки системы АК-58 до 8 ч (АК-50) на порядок понижает ее активность, что может быть связано с изменением природы активных центров и с концентрацией активной фазы, формирующейся в ходе МА.

Выводы

Таким образом, впервые в одну стадию получены высокоактивные двухкомпонентные катализаторы путем непосредственного механохимического сочетания крупнодисперсных порошков кобальта (никеля) с дисульфидом молибдена. Выявлены оптимальные условия приготовления Ni- и Со-содержащих систем, которые обеспечивают ультранизкий уровень серы в модельной реакции гидрогенолиза дибензотиофена. Показано, что реакции протекают параллельно по двум маршрутам.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (грант РФФИ № 24-44).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Eijsbouts S., Mayo S.W., Fujita K. Unsupported transition metal sulfide catalysts: from fundamentals to industrial application // Applied Catalysis A: General. – 2007. – № 322. – P. 58–66.
- Механохимический синтез нанокристаллических никель-молибденовых соединений, их морфологические особенности и применение в катализе. I. Влияние атомного отношения Ni:Mo на строение и свойства никель-молибденовых соединений, получаемых в условиях механохимического синтеза / О.А. Княжева, О.Н. Бакланова, А.В. Лавренов, В.А. Дроздов, Н.Н. Леонтьева, М.В. Тренихин, А.Б. Арбузов, В.А. Лихолобов // Кинетика и катализ. – 2011. – № 6. – С. 910–919.
- Механохимический синтез β-NiMoO₄ как предшественника массивного высокодисперсного катализатора гидрогенизационных процессов переработки нефтяных фракций / О.А. Княжева, О.Н. Бакланова, А.В. Лавренов, Е.А. Булучевский, Т.И. Гуляева, Н.Н. Леонтьева, В.А. Дроздов, В.А. Лихолобов, А.В. Василевич // Катализ в промышленности. – 2012. – № 3. – С. 30–37.
- Механохимический синтез нанокристаллических никель-молибденовых соединений, их морфологические особенности и применение в катализе. II. Влияние параметров механохими-

- ческой активации – энергонапряженности процесса и времени воздействия – на состав и структуру никель-молибденовых соединений / О.А. Княжева, О.Н. Бакланова, А.В. Лавренов, В.А. Дроздов, Н.Н. Леонтьева, А.В. Василевич, А.В. Шилова, В.А. Лихолобов // Кинетика и катализ. – 2014. – № 1. – С. 126–134.
- Механохимический синтез нанокристаллических никель-молибденовых соединений, их морфологические особенности и применение в катализе. III. Каталитические свойства массивных сульфидных Ni-Mo-катализаторов, синтезированных методом механохимической активации / О.А. Княжева, О.Н. Бакланова, А.В. Лавренов, Е.А. Булучевский, В.А. Дроздов, М.В. Тренихин, Н.Н. Леонтьева, А.В. Василевич, В.А. Лихолобов // Кинетика и катализ. – 2014. – № 1. – С. 135–143.
- Ni-Mo-W catalysts synthesized by mechanical alloying for HDS of dibenzothiophene R. Huirache-Acuna, M.I. Flores, M.A. Albiter, I. Estrada-Guel, C. Ornelas, F. Paraguay-Delgado, J.L. Rico // AZojomo. – 2006. – V. 2. URL: <http://www.azom.com/oars.asp> (дата обращения: 20.10.2014).
- Климов О.В. Производство дизельных топлив ЕВРО-5 и катализаторы для этих процессов // Нефтегазовый журнал. – 2013. – № 3. – С. 71–75.

8. Современные катализаторы гидроочистки нефтяных фракций / Г. Бухтиярова, О. Климов, А. Пашигрева, П. Александров, В. Кашкин, А. Носков // *Oil&Gas Journal Russia*. – 2010. – № 3. – С. 58–66.
9. Климов О.В. Бифункциональные катализаторы в гидрогенизационных процессах нефтепереработки // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2011. – № 1. – С. 59–66.
10. Катализатор гидроочистки углеводородного сырья, способ его приготовления и процесс гидроочистки: пат. России № 2402380; заявл. 13.08.09; опубл. 27.07.06, Бюл. № 30. – 1–13 с.
11. Влияние состава и морфологии наноразмерных сульфидов переходных металлов, приготовленных с использованием гетерополисоединений Андерсена $[X(OH)_6Mo_6O_{18}]^{n-}$ ($X=Co, Ni, Mn, Zn$) и $[Co_2Mo_{10}O_{38}H_4]^{6-}$, на их каталитические свойства / П.А. Никульшин, А.В. Можяев, Д.И. Ишутенко, П.П. Минаев, А.И. Ляшенко, А.А. Пимерзин // *Кинетика и катализ*. – 2012. – № 5. – С. 660–672.
12. $XMo_6(S)/\gamma-Al_2O_3$ и $Ni-XMo_6(S)/\gamma-Al_2O_3$ катализаторы ($X=Al, Ga, In, Fe, Co, Ni$) и их активность в гидрировании и гидрообессеривании / Н.Н. Томина, П.А. Никульшин, В.С. Цветков, А.А. Пимерзин // *Кинетика и катализ*. – 2009. – № 2. – С. 233–241.
13. Rinaldi N., Kubota T., Okamoto Y. Effect of citric acid addition on the hydrodesulfurization activity of MoO_3/Al_2O_3 catalysts // *Applied Catalysis A: General*. – 2010. – V. 374. – P. 228–236.
14. Hinnemann B., Norskov J.K., Topsoe H. A Density Functional Study of the Chemical Differences between Type I and Type II MoS_2 -Based Structures in Hydrotreating Catalysts // *Journal Physical Chemistry B*. – 2005. – V. 109. – P. 2245–2253.
15. Старцев А.Н. Сульфидные катализаторы гидроочистки: синтез, структура, свойства. – Новосибирск: Академическое издательство Гео, 2008. – 206 с.
16. Нефедов Б.К., Радченко Е.Д., Алиев Р.Р. Катализаторы процессов углубленной переработки нефти. – М.: Химия, 1992. – 272 с.
17. Structure and Nature of the Active Sites in CoMo Hydrotreating Catalysts. An EXAFS Study of the Reaction with Selenophene / B.R.G. Leliveld, J.A.J. Dillen, J.W. Geus, D.C. Koningsberger, M. Boer // *Journal physical chemistry B*. – 1997. – V. 101. – P. 11160–11171.
18. Можяев А.В. Катализаторы глубокой гидроочистки на основе Co_2Mo_{10} -гетерополисоединений и органических комплексонов Co (Ni): дис. ... канд. хим. наук. – М., 2012. – 173 с.
19. Акимов А.С. Полифункциональный массивный сульфидный катализатор гидрогенолиза. Подходы к регулированию свойств // *Химия и химическая технология в XXI веке: Матер. XIV Всерос. научно-практ. конф. им. профессора Л.П. Кулёва студентов и молодых ученых с междунар. участием*. – Томск, 2013. – С. 6–8.
20. Use of mechanoactivation for the preparation of sulfide hydrogenolysis catalysts / T.A. Fedushchak, M.A. Uyimin, A.Ye. Ermakov, A.S. Akimov, N.N. Shchegoleva., A.V. Vosmerikov, S.P. Zhuravkov, T.V. Petrenko // *Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies: the Book of Abstracts of the IV International Conference*. – Novosibirsk, 2013. – P. 38.
21. Direct Synthesis of Sulfide Multifunctional Catalysts for Hydrogenolysis / T.A. Fedushchak, M.A. Uyimin, A.S. Akimov, A.S. Morozov, A.V. Vosmerikov, S.P. Zhuravkov // *Molecular Aspects of Catalysis by Sulfides: the Book of Abstracts of the VIth International Symposium*. – France, Lion, 2013. – P. 84.
22. Использование механоактивации для получения сульфидных катализаторов гидрогенолиза / Т.А. Федущак, М.А. Уймин, А.Е. Ермаков, А.С. Акимов, Н.Н. Щеголева, Т.В. Петренко, С.П. Журавков, А.В. Восмериков // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2013. – № 6. – С. 683–687.

Поступила 15.01.2015 г.

UDC 66.092.094.25.097

HYDRODESULFURIZATION OF DBT WITH BULK SULPHIDE CATALYSTS. REACTION MECHANISM

Akim S. Akimov,

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: zerobox70@mail.ru

Maxim A. Morozov,

Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: fr0stm4n@yandex.ru

Taisia A. Fedushchak,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: taina@ipc.tsc.ru

Mikhail A. Uyimin,

Cand. Sc., Institute of Metal Physics UB RAS, 18, S. Kovalevskaya street, Ekaterinburg, 620990, Russia. E-mail: uimin@imp.uran.ru

Tatyana V. Petrenko,

Cand. Sc., Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: unicon@ipc.tsc.ru

Alexander V. Vosmerikov,

Dr. Sc., Institute of Petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: pika@ipc.tsc.ru

Sergey P. Zhuravkov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050,
Russia. E-mail: zhursp@yandex.ru

Nina N. Shchegoleva,

Institute of Metal Physics UB RAS, 18, S. Kovalevskaya street, Ekaterinburg,
620990, Russia. E-mail: Schegoleva@imp.uran.ru

The major problem of modern petroleum refining is the increasing efficiency of hydrogenation for producing high quality distillate fuel. Today hydroprocessing catalysts occupy a leading position among the other catalytic systems. When applying traditional supported catalysts the heavy oil components of petroleum disperse systems with a high molecular weight precipitate on the surface of the support granules and block the working surface of pores. Mesoporous supports with a relatively high pore size is not always effective. So, the annual increase in the proportion of publications relating to the massive (unsupported) sulfide catalysts of hydrogenolysis reflects the changes in the research direction. The relevance of the research is in urgent need to develop new methods and approaches to the synthesis of original, massive domestic sulfide catalyst systems with a high degree of activity and efficiency in hydrotreating of oil fuel fractions, a preparation of which is based on use of energy-saving and hi-tech approaches.

The main aim of the research is to synthesize bicomponent bulk sulfide catalysts in a single step by a solid phase method, to investigate their activity in a model hydrogenolysis reaction of dibenzothiophene, to determine the composition of products and the most probable mechanism of the reaction.

Methods of research: transmission electron microscopy, UV spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, gas chromatography-mass spectrometry.

Results. For the first time the authors have obtained in a single step the highly active bicomponent catalysts by direct mechanochemical combination of coarse cobalt (nickel) powders and molybdenum disulfide as promoter and precursors of the active component respectively. The systematic studies were performed to determine the effect of the ratio of initial reagents, duration of mechanoactivation on activity of dibenzothiophene hydrodesulfurization. The authors determined the optimal conditions for preparing Ni- and Co-containing systems providing ultra-low sulfur content (1–3 ppm) in a model dibenzothiophene hydrogenolysis and the composition of the reaction products. It was shown that the dibenzothiophene hydrogenolysis occurs concurrently with cracking and hydrogenation routes.

Key words:

Bulk sulfide catalysts, coarse powder, mechanical activation, model reaction of hydrogenolysis.

The research was financially supported by the Presidium of the RAS (RFBR grant no. 24–44).

REFERENCES

- Eijsbouts S., Mayo S.W., Fujita K. Unsupported transition metal sulfide catalysts: From fundamentals to industrial application. *Applied Catalysis A: General*, 2007, no. 322, pp. 58–66.
- Knjazheva O.A., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Drozdov V.A., Leont'eva N.N., Trenikhin M.V., Arbuzov A.B., Liholobov V.A. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline nickel-molybdenum compounds, their morphology and application in catalysis: I. Effect of the Ni: Mo atomic ratio on the structure and properties of nickel-molybdenum compounds prepared under mechanochemical synthesis conditions. *Kinetics and Catalysis*, 2011, no. 6, pp. 910–919.
- Knjazheva O.A., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Buluchevskij E.A., Guljaeva T.I., Leont'eva N.N., Drozdov V.A., Liholobov V.A., Vasilevich A.V. Mechanochemical synthesis of β -NiMoO₄ as a precursor of massive highly dispersed catalyst for hydrogenation processing of petroleum fractions. *Catalysis in Industry*, 2012, no. 3, pp. 30–37.
- Knjazheva O.A., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Drozdov V.A., Leont'eva N. N., Vasilevich A.V., Shilova A.V., Liholobov V.A. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline nickel – molybdenum compounds and their morphology and application in catalysis: II. Effect of mechanochemical activation parameters – process power density and exposure time – on the composition and structure of nickel – molybdenum compounds. *Kinetics and Catalysis*, 2014, no. 1, pp. 121–129.
- Knjazheva O.A., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Buluchevskij E.A., Drozdov V.A., Trenikhin M.V., Leont'eva N. N., Vasilevich A.V., Liholobov V.A. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline nickel-molybdenum compounds and their morphology and application in catalysis: III. Catalytic properties of massive Ni-Mo sulfide catalysts synthesized using mechanochemical activation. *Kinetics and Catalysis*, 2014, no. 1, pp. 130–138.
- Huirache-Acuna R., Flores M. I., Albiter M. A., Estrada-Guel I., Ornelas C., Paraguay-Delgado F., Rico J.L. Ni-Mo-W catalysts synthesized by mechanical alloying for HDS of dibenzothiophene AZojomo, 2006, vol. 2. Available at: <http://www.azom.com/oars.asp> (accessed 20.10.2014).
- Klimov O.V. Processes for the production of EUVRO – 5 diesel fuels and catalysts for these processes. *Oil&Gas Journal*, 2013, no. 3, pp. 71–75.
- Buhtjarova G., Klimov O., Pashigreva A., Aleksandrov P., Kashkin V., Noskov A. Sovremennye katalizatory gidroochistki nefljanynh frakcij [Modern catalysts of hydrotreating of petroleum fractions]. *Oil&Gas Journal*, 2010, no. 3, pp.58–66.
- Klimov O.V. Bifunctional Catalysts in Hydrogenation for Oil Processing. *Chemistry for Sustainable Development*, 2011, no. 1, pp. 59–66.
- Catalyst for hydrofining hydrocarbon material, method of preparing said catalyst and hydrofining process. Patent of Russia; no.2402380, Bull. № 30–p
- Nikul'shin P.A., Mozhaev A.V., Ishutenko D.I., Minaev P.P., Ljashenko A.I., Pimerzin A.A. Influence of the composition and morphology of nanosized transition metal sulfides prepared using the anderson-type heteropoly compounds $[X(OH)_6Mo_6O_{18}]^{n-}$ (X=Co,Ni,Mn,Zn) and $[Co_2Mo_{10}O_{38}H_4]^{6-}$ on their catalytic properties. *Kinetics and Catalysis*, 2012, no. 5, pp. 660–672.
- Tomina N.N., Nikul'shin P.A., Cvetkov V.S., Pimerzin A.A. Thiophene hydrodesulfurization and diesel fuel hydrorefining activities of XMo₆(S)/?-Al₂O₃ and Ni-XMo₆(S)/?-Al₂O₃ (X = Al, Ga, In, Fe, Co, and Ni) catalysts. *Kinetics and Catalysis*, 2009, no. 2, pp. 220–227.
- Rinaldi N., Kubota T., Okamoto Y. Effect of citric acid addition on the hydrodesulfurization activity of MoO₃/Al₂O₃ catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 2010, vol. 374, pp. 228–236.

14. Hinnemann B., Norskov J.K., Topsoe H. A Density Functional Study of the Chemical Differences between Type I and Type II MoS₂-Based Structures in Hydrotreating Catalysts. *Journal Physical Chemistry B*, 2005, vol. 109, pp. 2245–2253.
15. Starcev A.N. Hydrotreating sulfide catalysts: synthesis, structure, and properties. –Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo, 2008. –206 p.
16. Nefedov B.K., Radchenko E.D., Aliev R.R. Katalizatory processov uglublennoj pererabotki nefiti [Catalysts for deep processing of oil]. –M.: Chemistry, 1992. –272 p.
17. Leliveld B.R.G., Dillen J.A.J., Geus J.W., Koningsberger D.C., Boer M. Structure and Nature of the Active Sites in CoMo Hydrotreating Catalysts. An EXAFS Study of the Reaction with Selenophene. *Journal physical chemistry B*, 1997, vol. 101, pp. 11160–11171.
18. Mozhaev A.V. Katalizatory glubokoj gidroochistki na osnove Co₂Mo₁₀-geteropolisoedinenij i organicheskikh kompleksonatorov So (Ni): dissertacija kandidata himicheskikh nauk [Catalysts of deep hydrotreating based on heteropoly-Co₂Mo₁₀ and organic complexonates Co (Ni): the dissertation of the candidate of chemical sciences]. – Moscow, 2012. –173 p.
19. Akimov A.S. Polifunkcional'nyj massivnyj sul'fidnyj katalizator gidrogenoliza. Podhody k regulirovaniyu svojstv [Multifunctional massive sulphide catalyst of hydrogenolysis. Approaches to regulation of properties] // Himija i himicheskaja tehnologija v XXI veke: Materialy XIV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii imeni professora L.P. Kuljova studentov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem [All-Russian Scientific-Practical Conference them. Professor L.P. Kulyov for students and young scientists with international participation]. – Tomsk, 2013. – P.6–8.
20. Fedushchak T.A., Uyimin M.A., Ermakov A.Ye., Akimov A.S., Shchegoleva N.N., Vosmerikov A.V., Zhuravkov S.P., Petrenko T.V. Use of mechanoactivation for the preparation of sulfide hydrogenolysis catalysts. *Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies: The Book of Abstracts of the IV International Conference*. Novosibirsk, 2013. P. 38.
21. Fedushchak T.A., Uyimin M.A., Akimov A.S., Morozov A.S., Vosmerikov A.V., Zhuravkov S.P. Direct Synthesis of Sulfide Multifunctional Catalysts for Hydrogenolysis. *Molecular Aspects of Catalysis by Sulfides: The Book of Abstracts of the VIth International Symposium*. France, Lion, 2013. P. 84.
22. Fedushhak T.A., Ujmin M.A., Ermakov A.E., Akimov A.S., Shchegoleva N.N., Petrenko T.V., Zhuravkov S.P., Vosmerikov A.V. Mechanical Activation for Obtaining Sulphide Catalysts of Hydrogenolysis. *Chemistry for Sustainable Development*, 2013, no. 6, pp.683–687.

Received: 15 January 2015.

УДК 621.039

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОБЛУЧЕННЫМ ПЕРСПЕКТИВНЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Беденко Сергей Владимирович,

канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физико-энергетических установок
Физико-технического института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: bedenko@tpu.ru

Кнышев Владимир Владимиров,

студент каф. физико-энергетических установок Физико-технического
института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: vvk28@tpu.ru

Яковлев Максим Вадимович,

студент каф. физико-энергетических установок Физико-технического
института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: mcmillan@tpu.ru

Плевака Мария Николаевна,

студентка каф. физико-энергетических установок Физико-технического
института Томского политехнического университета, Россия,
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: batkamaxno2010@mail.ru.

В мировой атомной энергетике работают реакторы различного типа. Одним из путей реализации существующей в ядерной энергетике тенденции к повышению эффективности использования топлива, является повышение его глубины выгорания. Актуальность работы обусловлена проблемой, связанной с увеличением глубины выгорания как штатного топлива, так и новых видов топливных композиций, а также необходимостью в разработке регулирующих решений при обращении с этим топливом в системах хранения и транспортировки.

Цель работы: оптимизация параметров систем и схем обращения в процессе «сухого» хранения модифицированного топлива, облученного в уран-графитовом реакторе канального типа.

Методы исследования. Исследования и численные эксперименты выполнены с привлечением верифицированных расчетных кодов программ, на основе метода Монте-Карло (MCU5TPU и Scale), современных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VIII, JENDL-3.3, JEFF 3.0, EXFOR, РОСФОНД) и многогрупповых приближений. Совместное использование прецизионного расчетного кода программ MCU и Scale позволило провести верификацию полученных результатов численных экспериментов.

Результаты. Проведены расчетные исследования и численные эксперименты по определению нейтронно-физических характеристик систем «сухого» хранения облученного в уран-графитовом реакторе топлива. Кроме того, выполненные исследования позволят разработать технические и регулирующие решения при обращении с перспективным облученным топливом реакторных установок нового поколения. Оптимизированы параметры систем и схем обращения в процессе «сухого» хранения облученного топлива. Оптимизация осуществлена за счет чередующегося размещения слоев топлива с различной глубиной выгорания и обогащения.

Ключевые слова:

«Сухое» хранение, облученное ядерное топливо, эффективный коэффициент размножения нейтронов, мультиплицирующие системы, глубина выгорания.

Состояние исследований

На сегодняшний день повышение эффективности ядерной энергетике связано с решением двух основных задач. Первая задача связана с регенерацией облученного ядерного топлива (ОЯТ) атомных станций (АЭС) и возвращением его в топливный цикл. Вторая задача – увеличение глубины выгорания, как штатного топлива, так и новых видов перспективных топливных композиций типа $(Pu, Th)O_2$, $(U, Pu)O_2$, UC/(U, Pu) C, UN/(U, Pu) N).

Все это ведет к увеличению объемов ОЯТ, усложнению экологической обстановки, ядерной и радиационной опасности существующих реакторов и ядерных энергетических установок (ЯЭУ) но-

вого поколения. Сегодня в России особенно острой проблемой является хранение ОЯТ уран-графитовых реакторов (УГР) и других реакторных установок (РУ), топливо которых не перерабатывается и хранится в приреакторных хранилищах на АЭС.

Отметим, что расчетные исследования, выполненные авторами в рамках нескольких Государственных контрактов (Гос. контракта № П777, 2010?2012 гг., Соглашение № 14.В37.21.0473 от 3 августа 2012 г.), показали, что существует разумный предел выгорания керамического ядерного топлива.

Кроме того, увеличение глубины выгорания штатного оксидного топлива UO_2 , а также появление

новых перспективных керамических топлив для действующих реакторов и ЯЭУ нового поколения потребует разработки новых концептуальных подходов по обращению с этим топливом, обоснование безопасности существующих сегодня транспортных средств и систем долговременного хранения.

В настоящей работе рассматриваются концептуальные подходы и методология обращения с ОЯТ в системах «сухого» хранения ОЯТ (СХОЯТ). Приведены результаты численных исследований, направленных на определение нейтронно-физических и радиационных характеристик керамического ОЯТ.

Проведенные в работе теоретические исследования и численные эксперименты позволят разработать технические и регулирующие решения при обращении с ОЯТ РУ нового поколения.

Аналитическая модель ядерно-физических процессов, протекающих в уран-, плутоний- и торий-содержащих системах

При обращении с ОЯТ ЯЭУ нового поколения основная проблема будет связана с радиационной безопасностью, разработкой алгоритмов, процедур и регламентов обращения с учетом спектральных и интегральных характеристик ОЯТ [1?5].

В работах [3, 5–10] показано, что решение задач безопасного обращения с ОЯТ ЯЭУ нового поколения необходимо осуществлять с применением верифицированных расчетных кодов программ MCU и Scale [11, 12], физико-математических моделей [3, 5, 7–9] и современных библиотек оцененных ядерных данных [13?15].

Отметим, что существующие сегодня модели и методики расчета полей излучения вблизи ОЯТ разработаны и аттестованы в основном для оксидного топлива $UO_2/(U, Pu)O_2$, эксплуатировавшегося преимущественно в легководных РУ на тепловых нейтронах (PWR, BWR, ВВЭР) [6, 16, 17]. Кроме того, в попытке использовать Origen-Arp (Scale5) для расчета выгорания перспективных топливных композиций выяснилось, что разработчиками Scale накладывается жесткое ограничение на выбор типа топлива и его состава.

Таким образом, применение используемых сегодня методик и алгоритмов расчета для определения нейтронной составляющей радиационных характеристик новых видов топлив требует как минимум обоснования, а в ряде случаев существенного дополнения и модернизации. Кроме того, конструктивные особенности ЯЭУ нового поколения и

параметры их эксплуатации приводят к изменению характеристик поля излучения ОЯТ, влияющих на радиационную обстановку вблизи систем хранения и транспортировки, что не учитывается существующими сегодня методами расчета.

Авторами [5, 7] предложена оригинальная аналитическая модель ядерно-физических процессов, протекающих в топливе, которая позволила выделить основные каналы формирования нейтронов, включая нейтронные каналы вблизи порога реакции (α, n) и ранее не принимавшиеся во внимание фотоядерные резонансные процессы, протекающие в ОЯТ. Разработанная модель учитывает не только выход нейтронов и многообразие пороговых явлений на легких ядрах топливной керамики, но и спектр (α, n) - и (γ, xn) -реакций.

Результаты расчетов удельных выходов нейтронов q_i , (н/с/г) для наиболее значимых нуклидов, формирующих нейтронный фон, по предложенной авторами аналитической модели приведены в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения: q_i^α – удельный выход α -частиц, α /с/г; q_i^{sf} – удельный выход нейтронов спонтанного деления, sf /с/г; $q_i^{\alpha n}$ (MeX) – удельный выход нейтронов по реакции (α, n) , н/с/г (MeX); ω_i – массовая доля тяжелого металла в соединении.

Таким образом, зная нуклидный состав топливной композиции, можно сравнительно просто оценить интегральный выход нейтронов, а также вклад каждого изотопа в нейтронное излучение как облученных, так и не облученных топлив на основе U, Pu и/или Th.

Для расчета нуклидного состава ОЯТ использовался пакет программ MCU5. Программа MCU5 [12], по нашему мнению, является одной из совершенных программ, используемых для расчета нуклидного состава топлива и источников излучения. Особенности программы MCU5 позволили при расчетной оценке выхода нейтронов $(\varphi(\Delta E_i, r_i)$, нейтр.·см⁻²·с⁻¹) учесть тонкую структуру резонансной области поглощения нейтронов ядрами ²³²Th и ²³⁸U в области энергий от 4 до 24 эВ. Результаты численных экспериментов для серийного и модифицированного топлив, облученных в реакторе УТР, приведены в графическом виде на рис. 1.

Анализ полученных расчетных данных (рис. 1) показал, что тонкая структура резонансной области в зависимости сечения поглощения нейтронов от энергии для ²³²Th обеспечивает ему существенные преимущества по сравнению с ²³⁸U в части

Таблица 1. Радиационные характеристики некоторых радионуклидов и их соединений

Table 1. Radiative properties of some radionuclides and their compounds

| Нуклид/Nuclide | q_i^α , α /с/г | q_i^{sf} , sf /с/г | Q_i^{sf} , н/с/г | $q_i^{\alpha n}$ (MeO ₂)/ ω_i , н/с/г | $q_i^{\alpha n}$ (MeC)/ ω_i , н/с/г | $q_i^{\alpha n}$ (MeN)/ ω_i , н/с/г |
|-------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|--|--|--|
| ²³⁸ Pu | 6,342·10 ¹¹ | 1,205·10 ³ | 2,808·10 ³ | 1,337·10 ⁴ | 9,902·10 ³ | 9,430·10 ² |
| ²⁴² Cm | 1,226·10 ¹⁴ | 7,604·10 ⁶ | 1,772·10 ⁷ | 4,650·10 ⁶ | 3,182·10 ⁶ | 3,031·10 ⁵ |
| ²⁴⁴ Cm | 2,998·10 ¹² | 4,107·10 ⁶ | 1,109·10 ⁷ | 8,483·10 ⁴ | 6,031·10 ⁴ | 5,740·10 ³ |
| ²⁴¹ Am | 1,271·10 ¹¹ | 5,465·10 ⁻¹ | 1,640 | 2,673·10 ³ | 1,980·10 ³ | 1,886·10 ² |
| ²⁵² Cf | 1,986·10 ¹³ | 6,141·10 ¹¹ | 2,307·10 ¹² | 6,284·10 ⁵ | 4,380·10 ⁵ | 4,170·10 ⁴ |

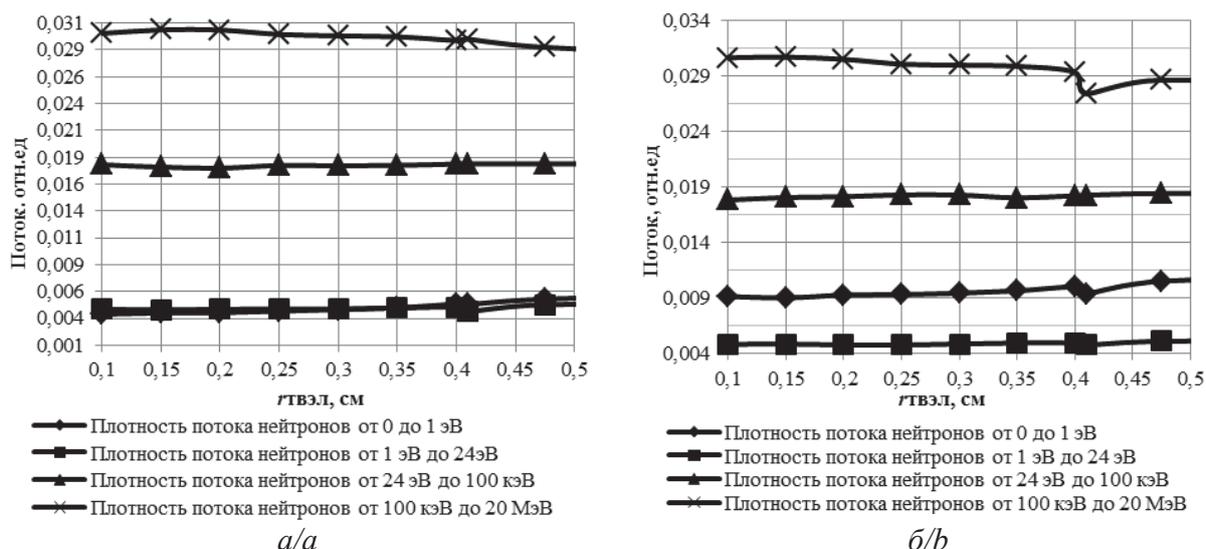


Рис. 1. Пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов в твэл полиячейки УГР для: а) урановой мультиплицирующей системы (3 % ²³⁵U, 97 % ²³⁸U) O₂; б) уран-ториевой мультиплицирующей системы (5 % U, 95 % Th) O₂

Fig. 1. Spatial-energy distribution of neutron flux density in a fuel element of uranium-graphite reactor polycell for: a) uranium multiplying system (3 % ²³⁵U, 97 % ²³⁸U) O₂; b) uranium-thorium multiple system (5 % U, 95 % Th) O₂

обеспечения безопасности (ядерной и радиационной) ядерных реакторов на тепловых нейтронах типа УГР.

В дальнейших исследованиях, проведенных для систем $\{(m\% \text{U}, n\% \text{Th})\text{O}_2, (m\% \text{Pu}, n\% \text{Th})\text{O}_2\}$, действующих на тепловых нейтронах, нами проведена оценка точности существующих методов описания резонансных эффектов. Расчетные оценки показали [18, 19], что формализм, описывающий процессы резонансного взаимодействия нейтронов с ядрами U и Th, не всегда обеспечивает удовлетворительное согласие с экспериментом (эксперименты выполнены на базе УНУ реактора ИРТ-Т, уникальный id работ RFMEFI59114X0001, Соглашение № 14.591.21.0001 от 15.08.2014 г.). Обнаруженная аномалия связана с особенностью волновых процессов взаимодействия нейтрона и параметрами внутреннего блок-эффекта в твэл на основе тория.

Механизмы взаимодействия нейтрона в области разрешенных и неразрешенных резонансов, эффекты резонансного поглощения и рассеяния относятся к классу нейтронно-волновых процессов и имеют аналогию с оптическими явлениями, несмотря на различную природу нейтронного и электромагнитного излучений [20, 21].

В случае взаимодействия нейтронов с энергией менее 1эВ в мультиплицирующих системах решением уравнения Шрёдингера является функция, которую можно записать следующим образом: $\psi(\mathbf{r}, t) = U(t) \cdot \Phi(\mathbf{0})$, где $\Phi(\mathbf{r}) = \sum C_i \psi_i$ – суперпозиция линейных комбинаций нейтронно-волновых функций ψ_i ; $\Phi(\mathbf{0})$ – начальное состояние квантовой системы (точка из которой начинается эволюция нейтронно-волновой функции); $U(t) = \exp(-iEt)$ – оператор, описывающий эволюцию системы во времени; E – полная энергия системы; собствен-

ные значения энергии E_i образуют энергетический спектр квантовой системы.

На этапе расчетной оценки теории резонансных эффектов установлено, что учет волновых процессов взаимодействия нейтронов в области энергий до 1эВ может привести к изменению критических параметров мультиплицирующих систем и заметной флуктуации потока тепловых нейтронов в области энергий от 4 до 24 эВ.

Таким образом, теория и математический формализм, описывающий резонансное взаимодействие нейтронов, требуют корректировки и детализации. Нейтронно-физические расчеты резонансного взаимодействия, включая определение параметров внутреннего блок-эффекта, должны проводиться после корректировки ядерных констант, коэффициентов поглощения и рассеяния.

Отметим, что имеющиеся в нашем распоряжении расчетные модули MCU5 и Scale5 позволяют проводить расчет энергетического спектра излучения только для оксидного топлива $\text{UO}_2 / (\text{U}, \text{Pu}) \text{O}_2$. Кроме того, в попытке использовать Origen-Agr (Scale5) для расчета выгорания перспективных топливных композиций выяснилось, что разработчиками Scale [8] накладывается жесткое ограничение на выбор типа топлива и его состава.

В связи с этим для нитридной (UN/(U, Pu) N) и карбидной (UC/(U, Pu) C) топливной керамики выход нейтронов спонтанного деления аппроксимировался функцией Уатта с константами, соответствующими спектру нейтронов деления ²⁴⁴Cm: $S_{sf}(E) = 0,172e^{-E} \text{sh}(2E)^{1/2}$, выход нейтронов по каналу (α, n) -реакции распределением Гаусса:

$S_{\alpha n}(E) = (2\pi a^2)^{-1} e^{-\frac{(E-b)^2}{2a^2}}$, а спектр фотоядерных (γ, xn) -реакций рассчитан в формализме Брейта-Вигнера: $S_{\gamma, xn}(E) = (\Sigma_{\gamma, xn} / \Sigma_i) (\Gamma/2)^2 (E_0/E)^{1/2} / ((E-E_0)^2 + (\Gamma/2)^2)$,

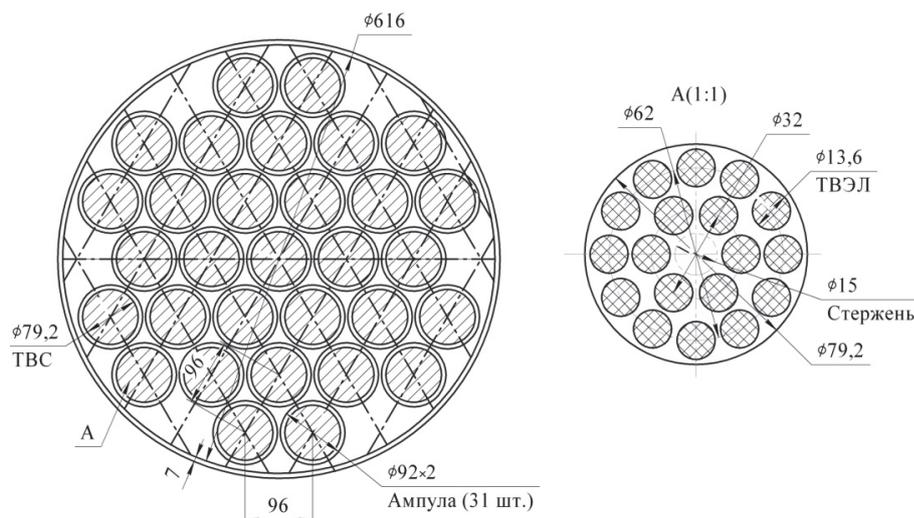


Рис. 2. Схема расположения ампул с ОЯТ УГР в пенале: А – схема расположений твэл в тепловыделяющей сборке

Fig. 2. Diagram of location of ampoules with spent nuclear fuel of uranium-graphite reactor in a tank: A is the diagram of fuel element location in a fuel assembly

где $\Sigma_{\gamma, \chi l}$ – макросечение реакции ($\gamma, \chi l$); Σ_t – полный коэффициент взаимодействия гамма-квантов, включающий фотоядерное взаимодействие; Γ – полуширина резонанса; E_0 – энергия максимума резонанса.

Расчетная модель системы «сухого» хранения облученного ядерного топлива

Хранение ОЯТ в России предусматривается в специальных гнездах, в которых размещаются герметичные пеналы с ОЯТ. Каждая камера хранения имеет 242 гнезда для герметичных пеналов с ОЯТ УГР, расположенных в гнезде в два яруса. Гнезда размещаются по квадратной решетке с шагом 1000 мм. Пенал представляет собой стальную трубу, в каждом пенале размещены по 31 ампулы с ОЯТ УГР (рис. 2).

Следует отметить, что аналитическая модель, предложенная в настоящей работе, позволяет провести лишь количественную оценку выхода нейтронов. Кроме того, конструкции активных зон и

твэл ЯЭУ нового поколения определили особенности проведения нейтронно-физических расчетов в системах «сухого» хранения штатного топлива УГР. Эта особенность заключается в том, что оценка выхода нейтронов в системах хранения проведена посредством совместного использования разработанной модели (табл. 1, [5, 7]), верифицированного расчетного кода программ MCU5 и Scale4.4.a. Это позволило учесть размножающие характеристики $\sim 1/(1-k_{eff})$ системы, резонансную структуру сечений взаимодействий, факторы самоэкранировки сечений, утечку нейтронов в процессе замедления и диффузии.

Для расчета значений k_{eff} в Scale4.4.a. создана расчетная модель, соответствующая реальной конструкции СХОЯТ ФГУП «Горно-химический комбинат». В Scale4.4.a. используется ячеечный метод моделирования, что существенно упрощает расчет нейтронно-физических параметров такой системы. При этом достаточно детально описывается геометрия одной ячейки (каждое гнездо расчетной

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Рис. 3. Массив размером 22×11, состоящий из ячеек одного типа

Fig. 3. 22×11 array which consists of one-type cells

модели с размещенным в нем пеналом представляет собой ячейку, или UNIT), затем задается поле – массив размером 22×11 UNIT. Пример заполнения массива ячейками приведен на рис. 3.

Аналитическая последовательность CSAS25 (Scale4.4.a) запускает модули BONAMI, NITAWL-II и KENO V.a. для обработки требуемых сечений, а затем в зависимости от начальных и граничных условий рассчитывает необходимые функционалы и k_{eff} .

Результаты расчета k_{eff} системы «сухого» хранения облученного ядерного топлива

«Свежее» топливо. В работе рассмотрены варианты штатных (заполнения хранилища водой, при отсутствии воды в самом гнезде с пеналом) и нештатных ситуаций (заполнение всего хранилища водой и всех ампул, находящихся в герметичных пеналах в гнезде хранилища).

При расчете k_{eff} СХОЯТ использовалось уран-эрбиевой (модифицированное) топливо обогащением 1,6; 2,0; 2,4; 2,6 и 2,8 %. Результаты расчета k_{eff} СХОЯТ для пяти схем загрузки:

- 1) в хранилище находится одно гнездо с пеналом, размещенное в центре, $k_{eff}=0,1252\pm0,0004$;
- 2) полная загрузка хранилища топливом, $k_{eff}=0,2829\pm0,0008$;
- 3) в хранилище находится одно гнездо с пеналом, размещенное в центре. Все остальное пространство заполнено водой, вода везде, кроме самого гнезда с пеналом, $k_{eff}=0,3572\pm0,0010$;
- 4) полная загрузка хранилища топливом. Все остальное пространство заполнено водой, вода

- 5) везде кроме гнезд с пеналом, $k_{eff}=0,3867\pm0,0009$;
- 6) полная загрузка хранилища топливом. Рассмотрена нештатная ситуация, при которой происходит заполнение всего хранилища водой и всех ампул, находящихся в герметичных пеналах в гнезде хранилища, $k_{eff}=0,8146\pm0,0014$.

Результаты расчета k_{eff} для топлива других вариантов обогащения сведены в табл. 2.

Таким образом, возникновение самоподдерживающейся реакции деления возможно для топлива с обогащением 2,6 и 2,8 % и только в случае нештатных аварийных ситуаций, когда происходит заполнение хранилища и отдельных его зон водой. Данное событие имеет пренебрежимо малую вероятность. Кроме того, ядерная безопасность при нештатной ситуации заведомо гарантирована при учете факта выгорания топлива [4].

«Выгоревшее» топливо. СХОЯТ полностью загружено ОЯТ. Характеристики ОЯТ: начальное обогащение по ^{235}U – 2 %, выгорание – 20, 25 и 30 ГВт·сут/т (У), выдержка – 10 лет. Расчет изотопного состава топлива и источников нейтронного излучения в ОЯТ ($\varphi(\Delta E_i)$, нейтр.·см⁻²·с⁻¹) проведен с использованием программы МСУ5.

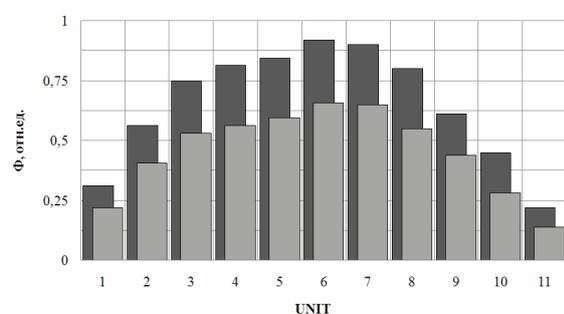
Эффективный коэффициент размножения в СХОЯТ, полностью загруженном ОЯТ УГР, составляет $k_{eff}=0,2229\pm0,0005$. Значения потоков нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве приведены на рис. 4.

Результаты численных исследований показали, что учет глубины выгорания топлива приводит к уменьшению значения k_{eff} на 27–30 %. С точки зрения ядерной безопасности система СХОЯТ яв-

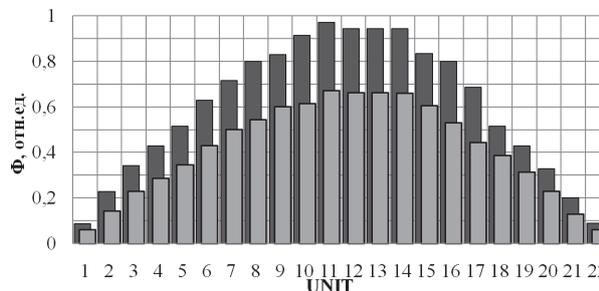
Таблица 2. Расчетные значения k_{eff} СХОЯТ для топлива различного обогащения

Table 2. Design values of k_{eff} dry storage spent nuclear fuel for fuel of different saturation

| Обогащение топлива, % Fuel saturation, % | Варианты загрузок Variants of loads | | | | |
|---|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1,6 | 0,1252±0,0004 | 0,2829±0,0008 | 0,3572±0,0010 | 0,3867±0,0009 | 0,8146±0,0014 |
| 2,0 | 0,1299±0,0004 | 0,3034±0,0006 | 0,3779±0,0010 | 0,4108±0,0011 | 0,8942±0,0014 |
| 2,4 | 0,1338±0,0004 | 0,3277±0,0007 | 0,4003±0,0011 | 0,4319±0,0013 | 0,9502±0,0015 |
| 2,6 | 0,1355±0,0004 | 0,3399±0,0008 | 0,4058±0,0012 | 0,4422±0,0012 | 0,9756±0,0017 |
| 2,8 | 0,1362±0,0004 | 0,3499±0,0008 | 0,4115±0,0012 | 0,4492±0,0011 | 0,9967±0,0014 |



a/a



б/б

Рис. 4. Значения потоков быстрых нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве; ■, ■ – выдержка ОЯТ УГР 0,5 и 10 лет соответственно. 1 отн. ед. равна а) 160; б) 350 см⁻²·с⁻¹

Fig. 4. Values of fast-neutron fluxes depending on UNIT location in the array; ■, ■ is the spent nuclear fuel storage in uranium-graphite reactor 0,5 and 10 years, respectively. 1 arb. Unit equals a) 160; б) 350 cm⁻²·s⁻¹

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
| 11 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 10 | 39 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 9 | 40 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 8 | 41 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 7 | 42 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 6 | 43 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 5 | 44 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 4 | 45 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 3 | 46 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 2 | 47 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| 1 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | |

Рис. 5. Массив размером 22x11. UNIT 1, 2, 3 – гнезда с пенами, выгорание 20, 25, 30 ГВт·сут/т соответственно; 5, 39–69 – пустые гнезда

Fig. 5. 22x11 array. UNIT 1, 2, 3 are the cells with the tanks, burn-up 20, 25, 30 GW-day/t respectively; 5, 39–69 are the empty cells

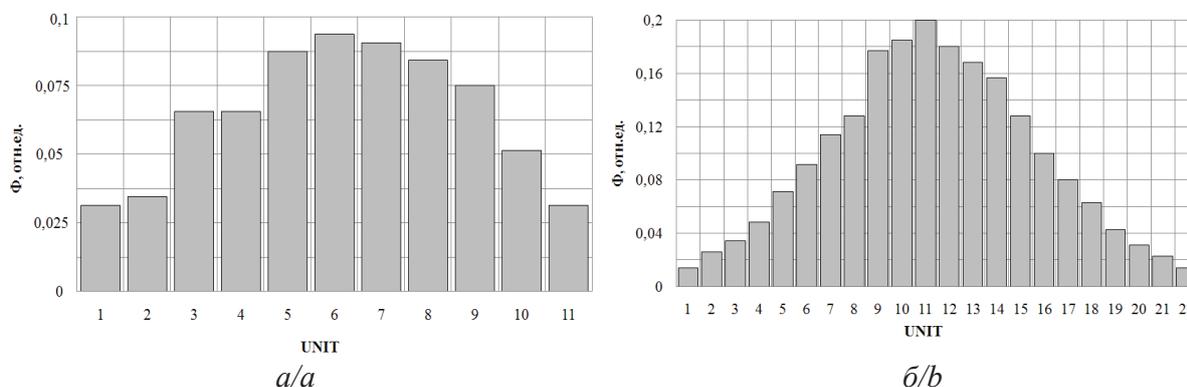


Рис. 6. Значения потоков быстрых нейтронов в зависимости от расположения UNIT в массиве, выдержка ОЯТ 10 лет. 1 отн. ед. равна а) 160; б) 350 см²·с⁻¹

Fig. 6. Values of fast-neutron fluxes depending on UNIT location in the array, spent nuclear fuel storage is 10 years. 1 arb. unit equals а) 160; б) 350 cm²·s⁻¹

ляется глубоко подкритической системой даже для штатных аварийных ситуаций. Однако уровни излучения по быстрым нейтронам превышают предельно допустимые значения при выгорании начиная от 20 ГВт·сут/т.

Анализ возможных нейтронно-физических состояний технических систем «сухого» хранения ОЯТ с различной глубиной выгорания показал, что необходима оптимизация схем размещения ОТВС в СХОЯТ с различной глубиной выгорания с целью уменьшения дозовой нагрузки на персонал.

На рис. 5 приведена одна из схем загрузки СХОЯТ, позволяющая снизить уровни нейтронного излучения в критических точках хранилища до предельно допустимых значений. Эффективный коэффициент размножения моделируемой системы равен $k_{eff} = 0,2148 \pm 0,0003$.

Значения потоков в зависимости от расположения UNIT в массиве приведены на рис. 6.

Оптимизация параметров систем и схем обращения в процессе «сухого» хранения облученного

топлива осуществлена за счет чередующегося размещения его слоев с различной глубиной выгорания и обогащения.

Заключение

Проведенные в работе теоретические исследования и численные эксперименты позволят повысить экологическую, ядерную и радиационную безопасность систем «сухого» хранения и транспортировки керамического облученного ядерного топлива реакторных установок нового поколения.

Выполненные исследования позволят разработать технические и регулирующие решения при обращении с перспективным облученным топливом реакторных установок нового поколения.

Совместное использование прецизионного расчетного кода программ MCU и Scale позволило провести верификацию полученных результатов численных экспериментов.

В работе показана необходимость в проведении дополнительных расчетов резонансного поглоще-

ния нейтронов ядрами с ярко выраженной резонансной структурой и корректировке ядерных констант, используемых в расчетах параметров резонансного поглощения и внутреннего блок-эффекта в ядерном топливе на основе теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роль ядерной энергетики в структуре мирового энергетического производства 21 в. / А.Ю. Гагаринский, В.В. Игнатьев, Н.Н. Пономарев-Степной, С.А. Субботин, В.Ф. Цибульский // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – № 5. – С. 323–335.
2. Строганов А.А., Курындин А.В., Аникин А.Ю. Анализ соответствия российской и международной нормативной базы по регулированию безопасности при транспортировании радиоактивных материалов и отработавшего ядерного топлива // Ядерная и радиационная безопасность. – 2011. – № 3. – С. 23–25.
3. Шмелев А.Н., Куликов Г.Г. О нейтронно-физических особенностях модифицированных топливных циклов // Известия ВУЗов. Серия: Ядерная энергетика. – 1997. – № 6. – С. 42–48.
4. Внуков В.С. Глубина выгорания как параметр ядерной безопасности хранилищ и транспортных упаковочных комплектов с отработавшим ядерным топливом // Атомная техника за рубежом. – 1990. – № 12. – С. 9–11.
5. Шаманин И.В., Буланенко В.И., Беденко С.В. Поле нейтронного излучения облученного керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 97–103.
6. Беденко С.В., Гнетков Ф.В., Кадочников С.Д. Дозовые характеристики полей нейтронов керамического ядерного топлива различных типов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 6–12.
7. Шаманин И.В., Беденко С.В., Губайдулин И.М. Пороговые реакции и предельные глубины выгорания облученного керамического ядерного топлива // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 2–2. – С. 8–12.
8. Materials of New Generation in Nuclear Power Industry / I.V. Shamanin, S.V. Bedenko, I.M. Gubayduln, N.G. Novikova // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 74–79.
9. Буланенко В.И., Фролов В.В., Центр Э.М. Расчетная оценка выхода нейтронов (α, n)-реакции для многокомпонентных сред // Атомная энергия. – 1982. – Т. 53. – № 3. – С. 160–168.
10. Okumara K., Mori T. Validation of a continuous-energy Monte-Carlo burn-up code MVP-BURN and its application to analysis of post irradiation experiment // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2000. – V. 47. – № 2. – P. 71–77.
11. Gauld I.C., Westfall R.M., Ilas G. Validation of ORIGEN for LWR used fuel decay heat analysis with Scale // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – V. 273. – P. 58–77.
12. Проект MCU. Моделирование процесса переноса частиц методом Монте-Карло. URL: <http://mcuproject.ru/rinfo.html> (дата обращения: 02.04.2014).
13. Алгоритмы расчета групповых констант энергоуглового распределения рассеянных нейтронов в среде из неподвижных ядер / Г.А. Гончаров, В.П. Горелов В.Н. Иванникова и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 1991. – № 1. – С. 38–43.
14. Расчет изотопного состава реакторных установок при моделировании процессов выгорания и остаточного энерговыделения ядерного топлива в программном комплексе CONCORD / С.В. Мжачих, А.В. Алексеев, А.Н. Гребенников и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов – 2014. – Т. 1. – С. 49–64.
15. Блохин Д.А., Митенкова Е.Ф., Блохин А.И. Подготовка полных библиотек ядерных данных в поточечном представлении на основе файлов оцененных данных ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0. – М.: ИБРАЭ РАН, 2011. ? 58 с.
16. Опаловский В.А., Тихомиров Г.В. Расчетные исследования параметров ОЯТ в целях безопасного обращения, учета и контроля. Научная сессия МИФИ-2002 // Сборник научных трудов. Т. 8. – М.: МИФИ, 2002. – С. 98–100.
17. Kryuchkov E.F., Opalovsky V.A., Tikhomirov G.V. Comparative Analysis of Radiation Characteristics from various types of Spent Nuclear Fuel // Proc. of the SNA-2003. – Paris, France, 2003. – P. 71–77.
18. The Use of (Th, U, Pu) O₂ Fuel in a Water Water Energy Reactor (WWER-1000): Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P.(97) Computer Code / I.V. Shamanin, A.A. Ukhov, H.J. Rutten, K. Haas, W. Sherer. – Forschungszentrum Julich, FZJ-ISR-IB-1/99, 1999. – 40 p.
19. Шаманин И.В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11. – С. 47–53.
20. Hodgson P.E. The Optical Model of Elastic Scattering. – Oxford: Clarendon press, 1963. – 230 p.
21. Shiroya S., Kudo K. Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium/Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly // PHYSOR 2004 – The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments. – Chicago Illinois: American Nuclear Society, 2004. – P. 112–117.

Поступила 11.12.2014 г.

UDC 621.039

CONCEPTUAL APPROACHES AND METHODS OF TREATING THE IRRADIATED POTENTIAL NUCLEAR FUEL

Sergey V. Bedenko,

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

Vladimir V. Knyshev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: utas_1993@inbox.ru

Mikhail V. Yakovlev,

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

Maria N. Plevaka,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: batkamaxno2010@mail.ru

Various types of reactors are applied in the world nuclear power industry. One of the ways to implement the existing trend to increase the effectiveness of using nuclear fuel in nuclear power engineering is the growth of its burn-up fraction. The relevance of the research is caused by the problem related to increase of burn-up fraction depth both of normal nuclear fuel and new types of fuel, as well as by the necessity to develop the conceptually new approaches to handling such fuel in storage systems and transport means.

The main aim of the research is to optimize the system parameters and schemes of handling in «dry» storage of spent fuel irradiated in uranium-graphite reactor of channel type.

The methods. The research and numerical experiments were carried out with the assistance of verified computer codes programs based on the Monte Carlo method (MCU5TPU and Scale5), modern evaluated nuclear data library (ENDF/B-VIII, JENDL-3.3, JEFF 3.0, EXFOR, ROSFOND) and multi-group approximation. The sharing of the precise calculation program code of MCU and Scale allowed carrying out the verification of the obtained results of numerical experiments.

The results. The authors have carried out the computational studies of the neutron-physical characteristics of the system of «dry» storage of spent nuclear fuel irradiated in the uranium-graphite reactor. Practical recommendations for optimizing the system parameters and schemes of handling and placement of spent fuel in a «dry» storage were developed. The system parameters and handling schemes in the process of «dry» storage of spent fuel optimized due to the alternating layers of placing fuel with different burn-up and enrichment.

Key words:

«Dry» storage system, spent nuclear fuel, effective neutron multiplication factor, burn-up fraction, multiplying system.

The research was supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation, the agreement from 3 August 2012. No. 14.B37.21.0473 «Minimization of neutron resonance absorption, increase of fuel-element lifetime duration and decrease of spent nuclear fuel radiotoxicity in new generation reactor assemblies».

REFERENCES

1. Gagarin A.Yu., Ignatiev V.V., Ponomarev-Steppe N.N., Subbotin S.A., Tsibulsky V.F. Rol yadernoy energetiki v strukture mirovogo energeticheskogo proizvodstva 21 v [Role of nuclear energy in the structure of world energy manufacture 21]. *Atomic Energy*, 2005, vol. 99, no. 5, pp. 323–335.
2. Stroganov A.A., Kuryndin A.V., Anikin A.Yu. Analiz sootvetstviya rossiyskoy i mezhdunarodnoy normativnoy bazy po regulirovaniyu bezopasnosti pri transportirovani radioaktivnykh materialov i otrabotavshogo yadernogo topliva [Analysis of the compliance of the Russian and international normative base for the regulation security for transportation of radioactive materials and spent nuclear fuel]. *Nuclear and Radiation Safety*, 2011, no. 3, pp. 23–25.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G. O neytronno-fizicheskikh osobennostyakh modifitsirovannykh toplivnykh tsiklov [On the neutron-physical characteristics of the modified fuel cycles]. *News of high school. Nuclear power*, 1997, no. 6, pp. 42–48.
4. Vnukov V.S. Glubina vygoraniya kak parametr yadernoy bezopasnosti khranilishch i transportnykh upakovochnykh komplektov s otrabotavshim yadernym toplivom [Burn-up depth as the nuclear safety parameter of storing and transporting packagings of spent nuclear fuel]. *Atomic energy technology abroad*, 1990, no. 12, pp. 9–11.
5. Shamanin I.V., Bulanenko V.I., Bedenko S.V. Pole neytronnogo izlucheniya obluchennogo keramicheskogo yadernogo topliva razlichnykh tipov [Field of neutron radiation of irradiated ceramic nuclear fuel of different types]. *News of high schools. Nuclear power*, 2010, no. 2, pp. 97–103.
6. Bedenko S.V., Gnetkov F.V., Kadochnikov S.D. Dozovye kharakteristiki poley neytronov keramicheskogo yadernogo topliva razlichnykh tipov [Radiation doses characteristics of neutron fields of ceramic nuclear fuels of different types]. *News of high schools. Nuclear power*, 2010, no. 1, pp. 6–12.
7. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Gubaydulina I.M. Porogovye reaktsii i predelnye glubiny vygoraniya obluchennogo keramicheskogo

- yadernogo topliva* [Threshold reactions and limit burnup depth of irradiated ceramic nuclear fuel]. *News of high school. Physics*. 2014, vol. 57, no. 2–2, pp. 8–12.
8. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Gubaydulin I.M., Novikova N.G. Materials of New Generation in Nuclear Power Industry. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 74–79.
 9. Bulanenko V.I., Frolov V.V., Tsenter E.M. *Raschetnaya otsenka vykhoda neytronov (α, n)-reaktsii dlya mnogokomponentnykh sred* [The estimation of neutron yield of the (α, n)-reaction for multicomponent media]. *Atomic Energy*, 1982, vol. 53, no. 3, pp. 160–168.
 10. Okumara K., Mori T. Validation of a continuous-energy Monte-Carlo burn-up code MVP-BURN and its application to analysis of post irradiation experiment. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2000, vol. 47, no. 2, pp. 71–77.
 11. Gauld I.C., Westfall R.M., Ilas G. Validation of ORIGEN for LWR used fuel decay heat analysis with Scale. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 273, pp. 58–77.
 12. *Proekt MCU. Modelirovanie protsessa perenosa chastits metodom Monte-Karlo* [Project MCU. Modelling of process of transport of particles by the Monte Carlo method]. Available at: <http://mcu-project.ru/rinfo.html> (accessed 02.04.2014).
 13. Goncharov G.A., Gorelov V.P., Ivannikova V.N. Algoritmy rascheta gruppovykh konstant energouglovogo raspredeleniya rasseyannykh neytronov v srede iz nepodviznykh yader [Algorithms for calculating group constants of energy angular distribution of scattered neutrons in fixed nuclei media]. *Problems of Atomic Science and Technology. Mathematical modeling of physical processes*, 1991, no. 1, pp. 38–43.
 14. Mzhachikh S.V., Alekseev A.V., Grebennikov A.N. *Raschet izotopnogo sostava reaktornykh ustanovok pri modelirovanii protsessov vygoraniya i ostatochnogo energovydeleniya yadernogo topliva v programmnom komplekse CONCORD* [Calculation of isotopic composition of the reactor plants when modeling the processes of burnout and the residual energy of nuclear fuel in the software package CONCORD]. *Problems of Atomic Science and Technology. Mathematical modeling of physical processes*, 2014, vol. 1, pp. 49–64.
 15. Blokhin D.A., Mitenkova E.F., Blokhin A.I. *Podgotovka polnykh bibliotek yadernykh dannykh v potochechnom predstavlenii na osnove faylov otsenennykh dannykh ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0* [Preparation of complete nuclear data libraries in the pointwise representation on the basis of evaluated data files ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.1, JENDL-4.0]. *Preprint/Institute of Nuclear Safety Sciences*, № IBRAE-2011–08. Moscow, IBRAE, 2011. 58 p.
 16. Opalovsky V.A., Tikhomirov G.V. *Raschetnye issledovaniya parametrov OYaT v tselyakh bezopasnogo obrashcheniya, ucheta i kontrolya*. Nauchnaya sessiya MIFI-2002 [Settlement researches of spent nuclear fuel parameters for the safe handling, accounting and control. Scientific session of the MEPhi 2002]. *Collection of scientific works*. Moscow, MEPhi Press, 2002. Vol. 8, pp. 98–100.
 17. Kryuchkov E.F., Opalovsky V.A., Tikhomirov G.V. Comparative Analysis of Radiation Characteristics from various types of Spent Nuclear Fuel. *Proc. of the SNA-2003*. Paris, France, 2003. pp. 71–77.
 18. Shamanin I.V., Ukhov A.A., Rutten H. J., Haas K., Sherer W. The Use of (Th, U, Pu) O₂ Fuel in a Water Water Energy Reactor (WWER-1000): Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P.(97) Computer Code. *Forschungszentrum Julich, FZJ-ISR-IB-1/99*, 1999, 40 p.
 19. Shamanin I.V. Sledstviya, vyzvannye otlichiyami struktur rezonansnoy oblasti pogloshcheniya yader ²³⁸U i ²³²Th [Consequences caused by the differences in the structures of the resonance region of absorbing ²³⁸U and ²³²Th]. *Alternative Energy and Ecology*, 2006, no. 11 (43), pp. 47–53.
 20. Hodgson P.E. *The Optical Model of Elastic Scattering*. – Oxford: Clarendon press, 1963. 230 p.
 21. Shiroya S., Kudo K. Criticality Analysis of Highly Enriched Uranium/Thorium Fueled Thermal Spectrum Cores of Kyoto University Critical Assembly. *PHYSOR 2004 – The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments*. Illinois, American Nuclear Society, 2004. pp. 112–117.

Received: 11 December 2014.

УДК 622.233.53

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРФОРАТОРА

Глазов Алкон Наумович,

канд. техн. наук, доцент каф. теоретической и прикладной механики
Института физики высоких технологий Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: glazov@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания пневматических перфораторов с низким расходом воздуха.

Цель работы: изучение закономерностей работы распределительного устройства и получение данных для разработки энергосберегающей конструкции перфоратора с низким расходом воздуха.

Методы исследования: экспериментальные с использованием тензометрической аппаратуры с датчиками и расходомера воздуха. Обработка данных производилась на ЭВМ.

Результаты. Приведены результаты экспериментального исследования нового ударного механизма с двумя автономными клапанными распределительными органами пневматического перфоратора ПК-75М. Утверждается, что применение в ударном механизме одного распределительного органа не дает возможности осуществить экономичный цикл работы механизма. На примере исследованного устройства обосновывается идея о том, что использование распределительного устройства с двумя распределительными органами, отдельно управляющими рабочими камерами, позволяет значительно снизить расход воздуха. Дано описание конструкции ударного механизма колонкового перфоратора и работы распределительного устройства. Исследовано влияние массы, размеров и хода распределительных органов на рабочие процессы в камерах и функционирование распределительного устройства. Получены зависимости энергетических, силовых и временных характеристик работы ударного механизма и его элементов. Выявлены зоны устойчивой работы клапанов. Показано, что в ударном механизме осуществлена отсечка рабочих камер от сети к моменту открытия выхлопных окон. Выработаны предложения по дальнейшему повышению показателей ударного механизма. Определены расходные характеристики участка впускной линии камеры прямого хода. Показан характер процессов, происходящих в командном канале. Экспериментально исследовано влияние площади командного канала на энергетические и силовые характеристики механизма и на функционирование распределительного устройства. Исследовано влияние площади впускных каналов камеры обратного хода на работу ударного механизма. Расход воздуха нового механизма составил 3,8 м³/мин. Общий уровень шума перфоратора ПК-75М ниже на 8–10 дБ, чем у перфоратора ПК-75.

Ключевые слова:

Пневматический перфоратор, ударный механизм, распределительный орган, воздухораспределительное устройство, клапан, сжатый воздух, расход воздуха.

Введение

Общеизвестно широкое применение пневматических перфораторов в промышленности. Применяемые машины имеют высокий абсолютный и удельный расход сжатого воздуха, что приводит к значительным затратам на энергоресурсы, уменьшению производительности, ограничению применения мощных пневматических машин, тем более при централизованном снабжении сжатым воздухом устройств. Кроме того, наблюдается высокий уровень шума. Одним из основных источников которого является шум выхлопа [1, 2].

Свойства машин в значительной мере определяются структурой воздухораспределительного устройства. В большинстве зарубежных и отечественных типов машин ударного действия применяется один распределительный орган [3–15], функции которого выполняет клапан, золотник или поршень. Так как распределительный орган (РО) имеет два переключения за цикл работы, то невозможно осуществить в рабочих камерах необходимый экономичный цикл процессов. Наблюдаются значительные утечки сжатого воздуха из пневматической сети через камеры в атмосферу в период открытия поршнем выхлопных окон, что особенно характерно для клапанного и золотникового распределения. Причем наиболее длительное истечение происходит через камеру обратного хо-

да. Длительность утечек может достигать до 32 % времени цикла работы. Например, у колонкового перфоратора ПК-75 длительность прямых утечек воздуха из магистрали в атмосферу составляет 23 % времени цикла. При этом доля этих утечек от величины расхода существенно больше, т. к. в период выхлопа скорость поступающего в цилиндр воздуха возрастает, что еще больше повышает уровень шума выхлопа воздуха.

Наиболее широко в перфораторах применяется воздухораспределительное устройство с одним РО в виде клапана различной конструкции, т. к. оно более простое и надежное в работе, позволяет осуществлять энергетические параметры в широком диапазоне значений.

Известные публикации посвящены исследованию распределений с одним РО и наиболее значительная их часть – изучению клапанных устройств [15–21]. Но нам не известны публикации по исследованию воздухораспределительных устройств перфораторов, содержащих два РО.

В настоящей работе излагаются некоторые результаты исследований воздухораспределительного устройства с двумя автономными РО опытного образца ударного механизма колонкового перфоратора ПК-75М, прошедшего испытания в Томском политехническом университете (ТПУ), в лаборатории НИПИрудмаша, на Лениногорском по-

лиметаллическом комбинате. Аналогом этой машины является колонковый перфоратор ПК-75.

Методика исследований

Испытания ударного механизма проводились на стенде с гидравлическим податчиком короткой штангой с крестовой коронкой по бетонному блоку. Тензометрическими датчиками давления регистрировалось давление воздуха в предраспределительной и рабочих камерах, в командных каналах и в впускном канале камеры обратного хода. Регистрация перекидки клапанов осуществлялась контактными датчиками. Для записи сигналов от датчиков применялись тензоусилители ТА-5, шлейфовый осциллограф Н-115, мост сопротивлений и шунтов Р-155. Расход воздуха измерялся расходомером переменного перепада давления воздуха, состоящего из сужающего устройства и дифманометра ДТ-50. Расчет величины расхода воздуха и оценка погрешности его определения производились в соответствии с ГОСТ 8.586.5-2005. Определение характеристик работы ударного узла производилось на ЭВМ. Исходными данными являлись параметры диаграмм давления воздуха, масса и площадь поршня.

Устройство и работа объекта исследования

В Томском политехническом университете была разработана конструкция ударного механизма (рис. 1) с новым воздухораспределительным устройством [22] для колонкового перфоратора ПК-75М с независимым вращением бура, образцы которого были исследованы. Основные результаты обоснования и разработки, исследования рабочих процессов новых ударных механизмов изложены в работах [23-29].

Опишем работу ударного механизма. Поршень находится в переднем положении (рис. 1). Камера – о через командный канал – с и проточку поршня – 2 сообщается с атмосферой через выхлопное окно – в. Клапан – 4 с толкателем – 5 находятся в верхнем положении. Сжатый воздух поступает по каналу – г в камеру обратного хода цилиндра – 1, поршень – 2 перемещается вверх. Клапан – 6 с толкателем – 7 находятся в нижнем положении. При дальнейшем перемещении поршень открывает командный канал – с, сжатый воздух из камеры обратного хода поступает в камеру – о. Сумма сил, действующих на верхние торцевые поверхности толкателя – 5 и клапана – 4, больше, чем сила под клапаном. Клапан – 4 с толкателем – 5 перекидываются в нижнее положение, и впуск воздуха в цилиндр прекращается до начала открытия поршнем выхлопного окна – в. Оставшийся в камере обратного хода сжатый воздух истекает при открытии поршнем выхлопного окна – в. Далее поршень перекидывает выхлопное окно – е и сжимает воздух в камере прямого хода. Поступающий по командному каналу – д в камеру – р воздух способствует устойчивому нижнему положению клапана – 6. Затем камера – р через канал – д сообщается через

проточку поршня и выхлопное окно – е с атмосферой. Клапан – 6 с толкателем – 7 перемещаются вверх, и сжатый воздух поступает в камеру прямого хода. Далее поршень занимает верхнее рабочее положение и начинается его прямой ход (рис. 1).

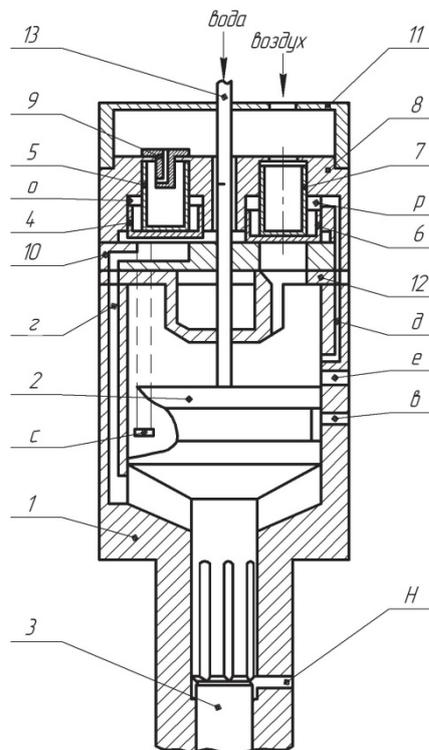


Рис. 1. Схема ударного механизма с воздухораспределительным устройством: 1 – цилиндр с выхлопными окнами е и в; 2 – поршень; 3 – буровая штанга; 4, 5 – клапан и толкатель камеры обратного хода; 6, 7 – клапан и толкатель камеры прямого хода; 8 – распределительная коробка; 9 – дроссель; 10 – клапанная плита; 11 – крышка; 12 – крышка цилиндра; 13 – трубка подачи промывочной жидкости; о, р – камеры над клапанами; с, д – командные каналы камер обратного и прямого хода соответственно; г – впускной канал камеры обратного хода; Н – отдушина

Fig. 1. Scheme of the percussion mechanism with air distribution device: 1 is the cylinder with exhaust ports e and v; 2 is the piston; 3 is the drill rod; 4, 5 are the valve and pusher of a reverse chamber; 6, 7 are the valve and pusher of a forward chamber; 8 is the distribution box; 9 is the choke; 10 is the valve plate; 11 is the cover; 12 is the cylinder cover; 13 is the drilling fluid supply tube; o, p are the chambers over the valves; c, d are the command channels of the reverse and forward chambers respectively; r is the inlet port of the reverse chamber; H is the vent

Под действием давления воздуха поршень двигается вперед и через некоторое время открывает командный канал – д, сжатый воздух из камеры прямого хода поступает в камеру – р. Клапан – 6 с толкателем – 7 перемещаются до упора в клапанную плиту – 10, т. е. происходит отсечка камеры прямого хода от сети. Оставшийся воздух истекает в атмосферу при открытии поршнем выхлопного окна – е. Поршень сжимает воздух в камере обратного хода, который поступает по каналу – г под

клапан и в камеру – о над клапаном – 4. Клапан – 4 с толкателем – 5 находятся в нижнем положении. При дальнейшем движении поршня камера – о с командным каналом – с соединяются через проточку поршня и выхлопное окно – в с атмосферой. Клапан – 4 с толкателем – 5 перемещаются вверх, а затем происходит удар поршня по буровой штанге – 3. Под действием импульса отскока и давления сжатого воздуха начинается следующий цикл работы механизма.

Рассмотрим характерные моменты работы распределительного устройства (рис. 2).

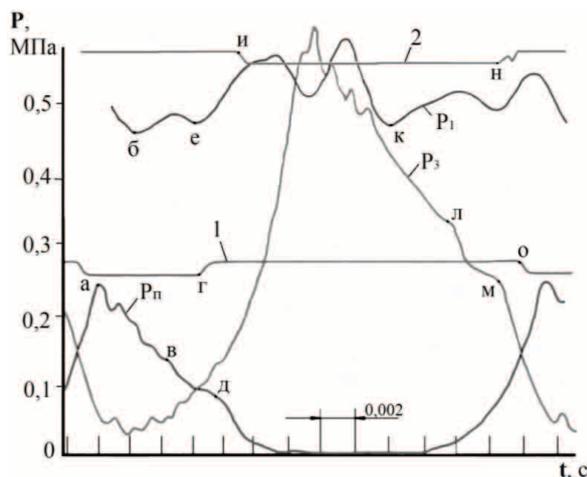


Рис. 2. Оциллограмма рабочих процессов ударного механизма: 1 и 2 – перекидка клапанов камер обратного и прямого хода соответственно; P_3 , P_n и P_1 – давление воздуха в камерах прямого и обратного хода, предклапанной камере ударного механизма соответственно

Fig. 2. Oscillogram of the percussion mechanism operating processes: 1 and 2 is the reversal of valves in the reverse and forward chambers respectively; P_3 , P_n and P_1 is air pressure in the reverse and forward chambers, prevalve chamber of the percussion mechanism respectively

Характерные точки на диаграмме давления воздуха в камере обратного хода соответствуют: а – переднему положению поршня; в – началу открытия командного канала с; д – открытию выхлопного окна в (рис. 1). На линии 1 точки г и о соответствуют моментам посадки и отрыва клапана – 4 от седла клапанной плиты – 10. На диаграмме давления воздуха в камере прямого хода точки л и м означают моменты открытия командного канала – д и выхлопного окна – е (рис. 1) соответственно в период прямого хода поршня. На линии 2 в моменты времени, соответствующие точкам и и н, наблюдается начало подъема и посадки клапана – 6 на клапанную плиту – 10 (рис. 1). На диаграмме давления воздуха P_1 до точки б наблюдается интенсивный впуск воздуха в камеру после отрыва клапана от седла. Точка е соответствует прекращению впуска воздуха в цилиндр. До этого момента кратковременно наблюдается падение давления, т. е. увеличение расхода воздуха из-за открытия командного канала. В целом кривая давления возду-

ха P_1 отражает изменение мгновенного расхода воздуха и процесс работы ударного механизма, а также дает возможность определить параметры дросселирования воздуха на участке между предклапанной камерой и рабочими камерами.

Из диаграмм 1 и 2 работы клапанов следует, что в периоды времени от точки г до точки и и от точки н до точки о сжатый воздух не подается в цилиндр. Моменты впуска и отсечки воздуха по рабочим камерам не совпадают. Все это позволяет осуществить необходимый цикл процессов в рабочих камерах и снизить непроизводительный расход воздуха.

Влияние параметров и хода распределительного органа

Масса РО влияет на динамику и рабочие процессы перфоратора. Чем тяжелее РО, тем позже он отрывается от седла и дольше перебрасывается. При этом в период обратного хода поршня клапан – 6 (рис. 1) отходит от седла при более высоких давлениях воздуха в камере прямого хода. Так, если массу РО увеличить в 1,28 раза, то давление в камере к началу поднятия клапана больше в 1,15 раза, и растет оно менее интенсивно, частота ударов возрастает в 1,055 раза, максимальное значение давления воздуха в камере ниже. Время от открытия командного канала до посадки клапана на клапанную плиту увеличивается, например, при замене стального РО на дюралюминиевый время от открытия командного канала до посадки клапана камеры прямого хода изменяется на 0,001 с. Доля периода впуска воздуха от времени цикла практически не зависит от массы РО.

Временные характеристики работы РО и энергетические параметры перфоратора зависят от размеров толкателя и клапана. В табл. 1 представлены результаты испытаний ударного механизма для двух диаметров толкателя РО камеры прямого хода, где: K – отношение диаметра толкателя к диаметру клапана; n – частота ударов; A_y – энергия удара; N – мощность; S – ход поршня; Q – расход воздуха; P_o , P_k , P_i , P_s – максимальное, предвыхлопное, среднее по времени и результирующее среднее по пути давление воздуха соответственно.

Таблица 1. Характеристики работы ударного механизма

Table 1. The percussion mechanism performance characteristics

| K | n, Гц (Hz) | Ay, Дж (J) | N, кВт (kW) | МПа (MPa) | | S, мм (mm) | МПа (MPa) | | Q, м³/мин (m³/min) |
|-------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | | | P _o | P _k | | P _i ·10 | P _s ·10 | |
| 0,577 | 37,9 | 146 | 5,54 | 0,61 | 0,24 | 57,5 | 2,97 | 2,18 | 4,9 |
| 0,5 | 40 | 134,5 | 5,35 | 0,6 | 0,25 | 52,7 | 3 | 2,31 | 5,2 |

Изменение величины отношения диаметров K приводит к перераспределению сил, действующих на площадки РО, и, как следствие, влияет на работу перфоратора. Следует отметить, что при K менее 0,5 может наблюдаться потеря устойчивости работы РО камеры прямого хода.

РО является турбулентным дросселем. Изменяя сечение впускной щели, можно создавать различные гидравлические сопротивления для потока воздуха. От этого зависит степень наполнения воздухом рабочей камеры, скорость перемещения поршня и другие характеристики ударного механизма.

Увеличение хода клапана камеры прямого хода сопровождается возрастанием энергетических параметров и расхода воздуха, а удельный расход воздуха q снижается до определенной величины (рис. 3). Это объясняется тем, что максимальное P_0 и предвыхлопное P_k давление воздуха увеличиваются (рис. 4) и степень наполнения камеры прямого хода становится больше. Время от открытия поршнем командного канала до посадки клапана на седло t_b , т. е. до прекращения впуска воздуха в камеру, возрастает. Время от посадки клапана до открытия выхлопного окна t_0 также изменяется.

При ходе клапана свыше 1,7–1,8 мм происходит запаздывание посадки клапана на клапанную плиту по отношению к моменту открытия выхлопного окна и, как следствие, появление прямого истечения сжатого воздуха из сети через цилиндр в атмосферу. Поэтому на графике (рис. 3) наблюдается перегиб кривых абсолютного и удельного расходов воздуха, снижение интенсивности роста энергии удара и мощности при дальнейшем увеличении хода клапана. Это является следствием роста давления недовыхлопа воздуха из камеры прямого хода, более значительного торможения поршня в период обратного хода и некоторого уменьшения значения давления воздуха в предклапанной камере.

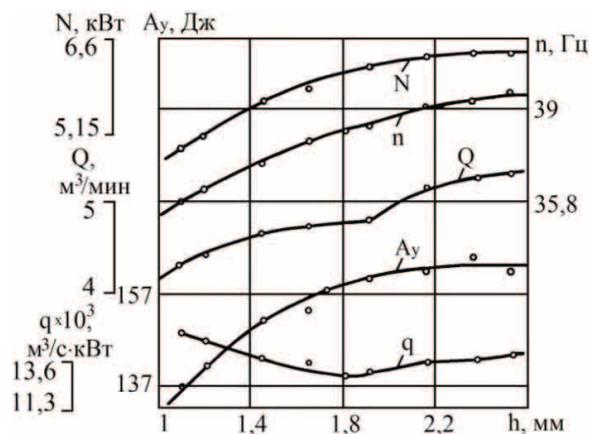


Рис. 3. Зависимости энергетических параметров ударного механизма от величины хода клапана камеры прямого хода при постоянном ходе клапана камеры обратного хода

Fig. 3. Dependence of energy parameters of the percussion mechanism on the value of the forward chamber valve travel at constant travel of the reverse chamber valve

Для достижения значительно более высоких значений степени наполнения воздухом камеры прямого хода и мощности ударного механизма необходимо увеличить площадь пропускной щели

под клапаном камеры прямого хода. Простым повышением величины хода клапана этого не добиться, тем более что будет наблюдаться прямое истечение воздуха из сети в атмосферу. Увеличение имеющегося расстояния от радиального отверстия в командный канал до выхлопного окна позволит назначить больший ход клапана с отсечкой впуска воздуха в камеру до открытия выхлопного окна. Тем самым существенно повысить степень наполнения камеры сжатым воздухом и увеличить энергетические параметры механизма.

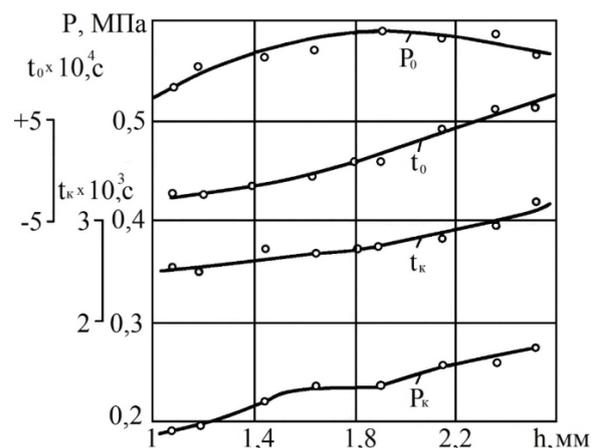


Рис. 4. Зависимости силовых и временных характеристик от величины хода клапана камеры прямого хода

Fig. 4. Dependence of power and time characteristics on the value of the forward chamber valve travel

Более эффективным путем повышения мощности, на наш взгляд, является увеличение имеющегося размера или установка двух РО камеры прямого хода с уточнением расстояния от выхлопного окна до командного канала. Такое конструктивное решение даст возможность, кроме всего прочего, уменьшить имеющийся нерационально большой ход клапана, что позволит улучшить временные характеристики работы РО.

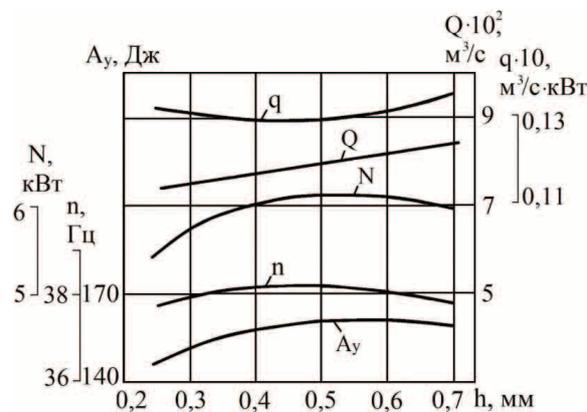


Рис. 5. Зависимости параметров ударного механизма от хода клапана камеры обратного хода

Fig. 5. Dependence of the percussion mechanism parameters on the reverse chamber valve travel

Характер зависимостей энергетических параметров ударного механизма от хода клапана камеры обратного хода виден из графика (рис. 5), полученного при ходе клапана камеры прямого хода 1,8 мм. Увеличение хода клапана приводит к некоторому возрастанию до определенного предела энергетических характеристик ударного механизма. Расход воздуха находится в прямолинейной зависимости от величины хода клапана. Существует оптимальное значение хода клапана по удельному расходу воздуха.

Индикаторная работа и расход воздуха в камере обратного хода зависят от работы произведенной камерой прямого хода и крепости обрабатываемой породы, т. к. чем больше предупредная скорость поршня и крепость породы, тем выше скорость отскока поршня. Эти факторы сказываются на значениях энергетических параметров, расходе воздуха и оптимальной величине хода клапана камеры обратного хода.

Диапазон возможных значений хода РО камеры обратного хода имеет ограничения. При величине хода РО менее 0,4 мм заметно ухудшается запуск ударного механизма. Наблюдается потеря устойчивости работы РО при соотношении площади впускной щели к площади впускного канала камеры более 0,35. Это объясняется недостаточной пропускной способностью впускного канала камеры обратного хода. В исследованном диапазоне значений хода РО происходит полная отсечка камеры обратного хода от предклапанной камеры до открытия выхлопного окна (рис. 2).

Экспериментально установлено, что минимальный удельный расход воздуха достигается при следующих значениях хода клапанов: 1,85 мм для камеры прямого хода и около 0,5 мм для камеры обратного хода, что соответствует вполне определенным имеющимся размерам РО.

Для достижения более высоких технико-экономических показателей работы механизма просматривается необходимость уменьшения размеров РО камеры обратного хода и увеличения размеров РО камеры прямого хода. При этом может быть увеличен ход клапана камеры обратного хода и уменьшен ход клапана камеры прямого хода. Уменьшение хода клапана камеры прямого хода и увеличение хода клапана камеры обратного хода позволит существенно повысить энергетические параметры механизма при низком расходе воздуха, гарантировать полную отсечку рабочих камер от сети до открытия выхлопного окна и улучшить запуск механизма.

Исследование коммуникационных линий

Пропускную способность участка пневмолинии между предклапанной и рабочей камерой, т. е. там, где расположен клапан, характеризует эффективная площадь проходного сечения. Вышеприведенный экспериментальный материал позволяет определить значения f_s по формуле [30]:

$$f_s = (0,95G) / \left[\frac{2qk}{(k-1)RT_1} \right]^{1/2} P_1 \varphi(\sigma),$$

где $\varphi(\sigma) = (\sigma^{2/k} - \sigma^{k+1/k})$ – расходная функция; $\sigma = p_1/p_2$ – отношение давления воздуха в рабочей камере к давлению воздуха в предклапанной полости; R – газовая постоянная; T_1 – температура истекающего воздуха; G – расход воздуха; q – ускорение силы тяжести; k – показатель адиабаты.

На рис. 6 представлены зависимости расходных характеристик участка линии между предраспределительной камерой и камерой прямого хода от времени впуска сжатого воздуха в период прямого хода поршня.

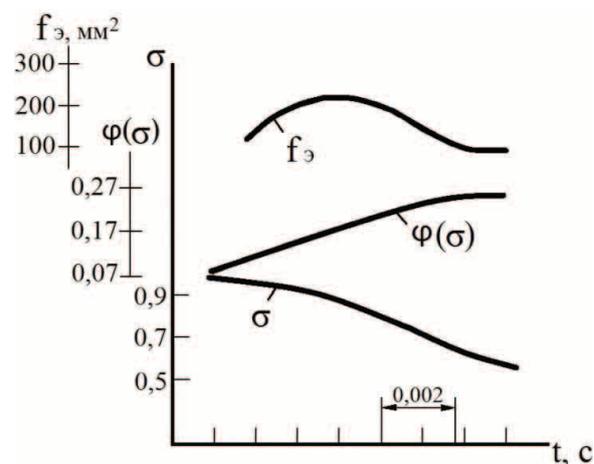


Рис. 6. Расходные характеристики впускного канала камеры прямого хода

Fig. 6. Pressure/flow characteristics of inlet channel of the forward chamber

Командный канал является коммуникационным каналом обратной связи рабочей камеры с РО. За цикл работы канал камеры прямого хода по три раза наполняется и опорожняется (рис. 7).

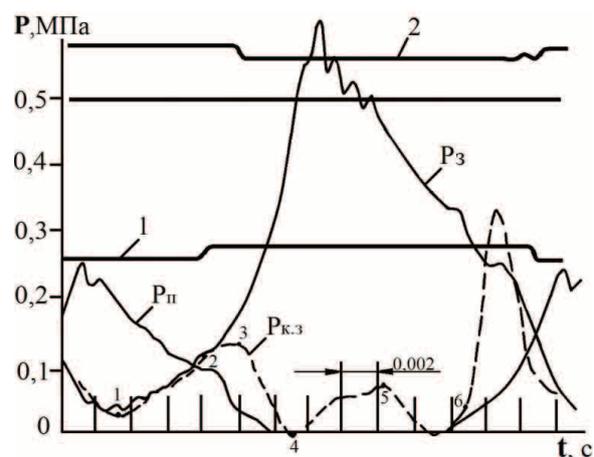


Рис. 7. Осциллограмма работы ударного механизма

Fig. 7. Oscillogram of the percussion mechanism operation

На кривой давления воздуха в командном канале $P_{кз}$ камеры прямого хода можно выделить ха-

рактерные точки: 1 – начало сжатия воздуха; 2 – канал перекрыт поршнем в период его обратного хода; 3 – канал сообщается через проточку поршня и выхлопное окно с атмосферой; 4 – канал перекрыт поршнем; 5 – канал открыт поршнем в период его прямого хода; 6 – подача управляющего сигнала на закрытие клапаном впускного отверстия. Процессы, происходящие в каналах, весьма сложны и зависят от многих факторов. При передаче управляющего сигнала по каналу имеет место сочетание двух процессов – разгона массы воздуха и волновых явлений.

Исследовано влияние площади командного канала на работу ударного механизма (рис. 8). При увеличении площади канала камеры прямого хода энергия удара и мощность возрастают до определенного предела, частота ударов падает, а расход воздуха практически не изменяется.

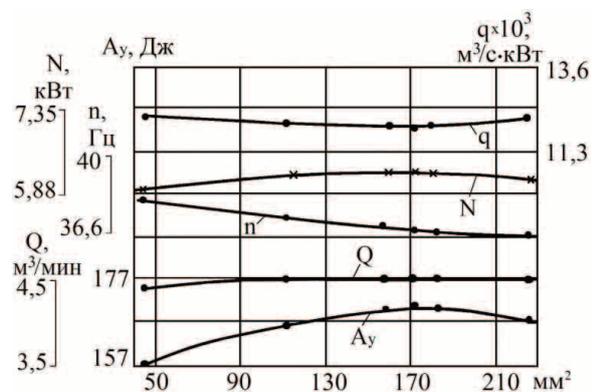


Рис. 8. Зависимости энергетических параметров ударного механизма от площади командного канала камеры прямого хода

Fig. 8. Dependence of the percussion mechanism parameters on the area of the forward chamber command channel

Как видно из графика, максимум мощности, энергии удара и минимум удельного расхода воздуха наблюдаются при одном и том же значении площади командного канала. Рост энергии удара, мощности и уменьшение частоты ударов объясняется тем, что командный канал является присоединенным объемом. Поэтому, вследствие меньшего сопротивления воздуха при обратном ходе поршня до начала впуска сжатого воздуха в камеру и снижения давления недовыхлопа воздуха (рис. 9), возрастает длина хода поршня и энергия удара до определенного предела.

В табл. 2 показано, как площадь командного канала камеры прямого хода при одном из значений хода клапана влияет на временные характеристики и на величину давления воздуха в камере к моменту начала поднятия клапана P_a и в момент открытия поршнем выхлопного окна P_b (рис. 9). Здесь t_o – время от открытия выхлопного окна до посадки клапана на седло; t_k – время от открытия поршнем командного канала до отсечки впуска воздуха; $t_{вп}$ – длительность впуска воздуха в камеру; $T_{ц}$ – длительность цикла работы. При уменьшении площади канала заметно возрастают времена t_o и t_k .

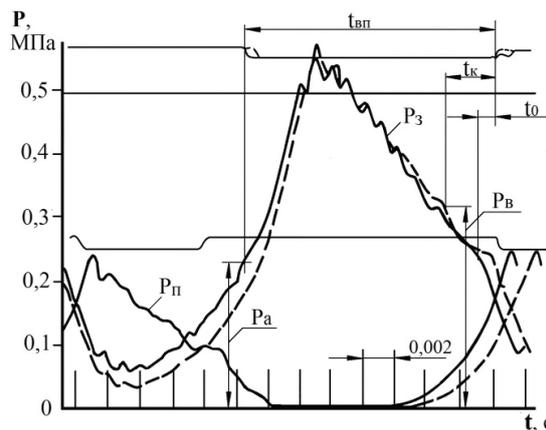


Рис. 9. Влияние площади командного канала на рабочие процессы ударного механизма: — – площадь 45 мм², --- – 226 мм²

Fig. 9. Influence of the command channel area on the percussion mechanism operating processes: — – area of 45 mm², --- – 226 mm²

Таблица 2. Силовые и временные характеристики

Table 2. Power and time characteristics

| Площадь канала, мм² Channel area, mm² | МПа (MPa) | | с/sec | | | $(t_{вп}/T_{ц}) \cdot 100, \%$ | $T_{ц}, C$ |
|--|-----------|-------|------------------|------------------|---------------------|--------------------------------|------------|
| | P_a | P_b | $t_o \cdot 10^3$ | $t_k \cdot 10^3$ | $t_{вп} \cdot 10^2$ | | |
| 45 | 0,228 | 0,313 | 1,35 | 3,68 | 1,574 | 60,5 | 0,026 |
| 112 | 0,225 | | 0,67 | | 1,52 | 57 | 0,0266 |
| 181 | 0,22 | 0,328 | 0,28 | 2,93 | 1,49 | 55 | 0,027 |
| 226 | 0,213 | 0,321 | 0,2 | 2,87 | 1,48 | 54,3 | 0,0273 |

Время t_k состоит из времени t_{k1} от момента начала подачи управляющего сигнала до начала движения РО и времени перекидки клапана t_{k2} . Время подготовительного периода равно:

$$t_{k1} = t_1 + t_2 + t_3,$$

где t_1 – время срабатывания датчика состояния, функции которого выполняет поршень; t_2 – время распространения волны давления от рабочей камеры до t_3 – время изменения давления в командной камере над клапаном. t_2 определяется через отношение длины канала к скорости звука в воздухе. Например, при ходе клапана камеры прямого хода 1,8 мм и площади командного канала 2,26 см² время t_{k1} составляет около 0,0022 с.

На рабочие процессы оказывает некоторое влияние площадь впускных каналов в камеру обратного хода. При уменьшении сечения каналов уменьшается объем сжимаемого в камере воздуха, несколько увеличиваются степень сжатия и давление воздуха к моменту удара. Работа на сжатие воздуха в камере в период прямого хода поршня возрастает. Скорость отскока поршня и текущее давление воздуха по времени в камере прямого хода в период обратного хода поршня становятся больше. Поэтому раньше по времени начинает отходить от клапанной плиты клапан. Происходит некоторое снижение максимального давления воздуха и энергетических параметров ударного меха-

низма. Минимальный удельный расход воздуха для данных условий и конструкции соответствует площади сечения впускных каналов около 3,2 см².

Заключение

Исследуемое распределительное устройство дало возможность реализовать отсечку рабочих камер от сети к началу выхлопа воздуха. В течение 18–20 % времени цикла воздух вообще не подается в цилиндр. В отличие от широко применяемых машин, где РО имеет два переключения и впуск воздуха в цилиндр происходит непрерывно, в новом устройстве РО переключается четыре раза за цикл работы, что позволило осуществить экономичный цикл рабочих процессов.

По результатам испытаний нового механизма в лаборатории НИПИрудмаша расход воздуха составил 3,8 м³/мин, удельный расход воздуха меньше в 2,3 раза в сравнении с аналогом – ударным механизмом перфоратора ПК-75. Общий уровень шума перфоратора ПК-75М ниже на 8–10 дБ в сравнении с перфоратором ПК-75.

Выявлены закономерности изменения энергетических, силовых и временных характеристик

ударного механизма и его элементов в зависимости от времени работы, размеров, массы и хода обоих РО, площади сечений командных и впускных каналов.

Установлены оптимальные по удельному расходу воздуха значения хода клапанов и площади сечений коммуникационных каналов для данного механизма.

Определены геометрические соотношения площадей впускных щелей и каналов, размеров толкателей и клапана, при которых обеспечивается устойчивая работа РО.

На основе экспериментального материала рассчитаны расходные характеристики впускного канала камеры прямого хода и показана их зависимость от времени работы механизма.

Показаны возможности и выработаны предложения по повышению энергетических параметров ударного механизма при низком расходе воздуха.

Полученный в результате исследований материал доказывает возможность и дает основания для создания энергосберегающих конструкций пневматических машин ударного действия, существенно превосходящих по КПД известные аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lashgari A., Kecojevic V. Assessment of Environmental Impact of Drilling Equipment // *J. Powder Metal Min.* – 2013. – V. 1. – P. 1–3.
- Kivade S.B., Murthy S.N., Vardhan H. Study of noise sources in pneumatic rock drills – its effect and control – a critical review // *J. the Indian Mining and Engineering.* – 2011. – V. 50. – № 1. – P. 12–23.
- Хоменко О.Е., Кононенко М.Н., Мальцев Д.В. Горное оборудование для подземной разработки рудных месторождений. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2011. – 448 с.
- Липин А.А. Современные погружные пневмоударники для бурения скважин в подземных условиях // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. – Екатеринбург: Уро РАН, 2009. – С. 69–75.
- Берагоен И.А., Дядюра А.Г., Бажал А.И. Бурильные машины. – М.: Недра, 1972. – 368 с.
- Wiehe J. Außenhammer-Bohrgeräte einer neuen Generation // *GP: Gesteins-Perspekt.* – 2011. – Bd. 15. – № 4. – S. 37–38.
- Jimeno E., Jimino C., Carcedo A. Drilling and Blasting of Rocks. – Rotterdam; Brookfield: A.A. Balkema, 1995. – 391 p.
- Zablocki A., Johansson L. Modern drilling and blasting techniques in underground mining // *Mining Latin America = Minería Latinoamericana: papers presented at the Mining Latin America.* – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1986. – P. 427–441.
- Васильев В.М. Перфораторы: справочник. – М.: Недра, 1989. – 215 с.
- Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
- Борисенко А.Е., Щербина В.Н., Супрун А.К. Пневматические бурильные головки // *Горный журнал.* – 1999. – № 10. – С. 47–48.
- Пневматические машины ударного действия для проходки скважин и шпуров / Н.Н. Есин, А.Д. Костылев, К.С. Гурков, Б.Н. Смоляницкий. – Новосибирск: Недра, 1987. – 214 с.
- Петров Н.Г., Родионов Н.С., Александров Ю.В. Бурильные машины и установки вращательного и ударно-вращательного действия за рубежом // *Добыча угля подземным способом: обзорная информация.* – М.: Центр. науч.-исслед. ин-т экономики и науч.-техн. информ. угол. пром-сти, 1987. – № 21. – С. 1–54.
- Колонковые перфораторы и бурильные машины / сост. В.Н. Барилевич. – М.: Центр. науч.-исслед. ин-т экономики и науч.-техн. информ. угол. пром-сти, 1986. – 38 с.
- Есин Н.Н. Пневматические машины ударного действия для бурения шпуров. – Новосибирск: ИГД, 1978. – 104 с.
- Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: ИГД, 1985. – 133 с.
- Пневматические ручные машины: справочник / Г.И. Кусницын, С.Б. Зеленецкий, С.И. Доброборский, С.А. Гринцер. – Л.: Машиностроение, 1968. – 371 с.
- Эльстер Г. О работающих по принципу разгрузки золотниковых распределителей в отбойных молотках. – Л.: Пневматика, 1953. – 34 с.
- Метелин Е.П. Исследование клапанных пневматических ударных машин для бурения скважин: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1971. – 25 с.
- Суднишников Б.В., Есин Н.Н. Воздухораспределительные устройства пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: ИГД, 1965. – 46 с.
- Ямпольский Д.З., Соколинский В.Б., Кашаев В.А. О переборке клапана пневматической ударной машины // *Науч. сообщ. Нац. науч. центра горн. пр-ва.* – 2010. – № 336. – С. 222–235. Это что?
- Устройство ударного действия: а.с. 575416 SU, МПК 6 E21C37/24, № 2321719; заявл. 04.02.76; опубл. 05.10.77.
- Глазов А.Н. Снижение удельного расхода воздуха пневматических машин ударного действия // *Известия вузов. Горный журнал.* – 1977. – № 2. – С. 102–105.
- Глазов А.Н. Рабочие процессы пневмоударного механизма перфоратора // *Известия Томского политехнического университета.* – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 132–136.

25. Глазов А.Н. Энергосберегающие конструкции пневмоударных бурильных машин // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 76–78.
26. Глазов А.Н. Расчетные зависимости статической модели рабочих процессов пневмоударного механизма // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 150–154.
27. Глазов А.Н. Разработка пневмоударных механизмов с экономичным циклом работы // Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. – Новосибирск: ИГД, 1987. – С. 67–69.
28. Глазов А.Н., Глазов Г.Н. Оптимальная степень наполнения камеры сжатым воздухом // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 6. – С. 84–87.
29. Глазов А.Н., Карепина Е.Е. К созданию бурильных машин с низким расходом воздуха // Актуальные проблемы машиностроения. – М.: Горная книга, 2013. – С. 3–5.
30. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

Поступила 19.01.2015 г.

UDC 622.233.53

RESEARCH OF ENERGY-SAVING AIR DISTRIBUTION UNIT OF A PERFORATOR

Alkon N. Glazov,

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

The relevance of the work is caused by the need to develop a pneumatic perforator with low airflow.

The aim of the research is to study the regularities of the distribution device operation and data obtain to develop energy-saving design of the perforator with low airflow.

Research methods: experimental strain gauge instrumentation with sensors and air mass flow. The data were computer analyzed.

Results. The paper introduces the results of experimental studies of the new hammer mechanism with two standalone distribution valve bodies of the pneumatic rock drill PC-75M. It has been affirmed that the use of a single distribution body in the shocking mechanism does not allow implementing a cost effective cycle of the mechanism operation. By the example of this device, the author substantiates the idea that the use of switchgear distribution with two bodies, managing separately by the working chambers, can significantly reduce air consumption. The paper describes the impactor core drill construction and the switchboard operation. The influence of the mass, size and stroke of the distribution bodies on the workflows in the chambers and the switchgear operation was studied. The author obtained the dependences of energy, power and time characteristics of the impact mechanism and its elements and identified the areas of the valves stable operation. It is shown that working chambers were cut-off from the network in the shocking mechanism by the moment of the exhaust windows opening. The author worked out the proposals on further increase of the hammer mechanism performance and defined the flow characteristics in the section of the intake line of the forward stroke chamber. The paper shows the nature of the processes occurring in the command channel. The influence of the command channel area on energy and power characteristics of the mechanism and the switchgear operation was studied experimentally. The authors studied as well the influence of the inlet channels area of the reverse camera on the hammer mechanism operation. The airflow of the new mechanism was 3,8 m³/min, the total noise of the rock drill PC-75M is 8–10 dB lower than that of the rock drill PC-75.

Key words:

Pneumatic rock drill, percussion mechanism, distribution agency, air distribution device, valve, compressed air, air flow.

REFERENCES

1. Lashgari A., Kecojevic V. Assessment of Environmental Impact of Drilling Equipment. *J. Powder Metal Min.*, 2013, vol. 1, pp. 1–3.
2. Kivade S.B., Murthy S.N., Vardhan H. Study of noise sources in pneumatic rock drills – its effect and control – a critical review. *J. the Indian Mining and Engineering*, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 12–23.
3. Khomenko O.E., Kononenko M.N., Maltsev D.V. *Gornoe oborudovanie dlya podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy* [Mining equipment for underground mining of ore deposits]. Dnepropetrovsk, National Mining University, 2011. 448 p.
4. Lipin A.A. *Sovremennye pogruchnye pnevmoudarniki dlya bureniya skvazhin v podzemnykh usloviyakh* [Modern DTH hammers for drilling in underground conditions]. *Razvitie resursosberegayushchikh tekhnologii vo vzryvnom dele* [Development of resource-saving technologies in explosive business]. Ekaterinburg, Ourno RAHN, 2009. pp. 69–75.
5. Begagoen I.A., Dyadyura A.G., Bazhal A.I. *Burilnye mashiny* [Boring machines]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 368 p.
6. Wiehe J. Außenhammer-Bohrgeräte einer neuen Generation. *GP: Gesteins-Perspekt*, 2011, Bd. 15, no. 4, S. 37–38.
7. Jimeno E., Jimino C., Carcedo A. *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam; Brookfield, A.A. Balkema, 1995. 391 p.
8. Zablocki A., Johansson L. Modern drilling and blasting techniques in underground mining. *MiningLatin America=Minería Latinoamericana: papers presented at the Mining Latin America*. London, Institution of Mining and Metallurgy, 1986. pp. 427–441.
9. Vasilev V.M. *Perforatory* [Hammers]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 215 p.
10. Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Drilling techniques in the development of mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
11. Borisenko A.E., Shcherbina V.N., Suprun A.K. *Pnevmaticheskie burilnye golovki* [Pneumatic drill head]. *Gornyi zhurnal*, 1999, no. 10, pp. 47–48.

12. Esin N.N., Kostylev A.D., Gurkov K.S., Smolyanitskii B.N. *Pnevmaticheskie mashiny udarnogo deistviya dlya prokhodki skvazhin i shpurov* [Pneumatic machine percussion for sinking wells and bore-holes]. Novosibirsk, Nedra Publ., 1987. 214 p.
13. Petrov N.G., Rodionov N.S., Aleksandrov Yu.V. *Dobycha uglja podzemnym sposobom: obzornaya informatsiya* [Burlilnye mashiny i ustanovki vrashchatelnogo i udarno-vrashchatelnogo deistviya za rubezhom]. Dobycha uglja podzemnym sposobom: obzornaya informatsiya [Coal mining by underground methods: an overview]. Moscow: The Central Science- Research Institute of Economics and technic scientific information of the coal industry, 1987. no. 21, pp. 1–54.
14. *Kolonkovye perforatory i burilnye mashiny* [Drifter and drills]. Composed by V.N. Barilovich. Moscow, Center. Scientific-issled. Inst economy and scientific and engineering. Inf. angle. prom-sti, 1986. 38 p.
15. Esin N.N. *Pnevmaticheskie mashiny udarnogo deistviya dlya bureniya shpurov* [Pneumatic machine percussion for drilling]. Novosibirsk, IGD, 1978. 104 p.
16. Sudnishnikov B.V., Esin N.N., Tupitsyn K.K. *Issledovanie i konstruirovaniye pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya* [Research and design of pneumatic percussion machines]. Novosibirsk, IGD Press, 1985. 133 p.
17. Kusnitsyn G.I., Zelenetskii S.B., Dobroborskii S.I., Grintser S.A. *Pnevmaticheskie ruchnye mashiny* [Manual pneumatic machine]. Leningrad, Mechanical Engineering, 1968. 371 p.
18. Elster G. *O rabotayushchikh po printsipu razgruzki zolotnikovyykh raspredelitelnykh v otboinykh molotkakh* [About spool valves working on the unloading principle in a jackhammer]. Leningrad, Pneumatics, 1953. 34 p.
19. Metelin E.P. *Issledovanie klapannykh pnevmaticheskikh udarnykh mashin dlya bureniya skvazhin. Avtoref. Dis. kand. nauk* [Investigation of valve pneumatic percussion drilling machines. Cand. Sc. Abstract]. Dnepropetrovsk, 1971. 25 p.
20. Sudnishnikov B.V., Esin N.N. *Vozdukhoraspredivelitelnye ustroystva pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya* [Air diffusers pneumatic percussion machines]. Novosibirsk, IGD Press, 1965. 46 p.
21. Yampol'skii D.Z., Sokolinskii V.B., Kashaev V.A. *O perebrozke klapana pnevmaticheskoi udarnoi mashiny* [About the transfer valve of the pneumatic shock machine]. *Nauch. soobshch. Nats. nauch. tsentra gorn. pr-va* 2010, no. 336, pp. 222–235.
22. Glazov A.N., Baburov V.I., Shaitarov A.N., Shapovalov E.A. *Ustroystvo udarnogo deistviya* [Percussion device]. Inventor's certificate, no. 2321719, 1977.
23. Glazov A.N. *Snizhenie udelnogo raskhoda vozdukha pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya* [Reduction of specific air flow of pneumatic percussion machines]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1977, no. 2, pp. 102–105.
24. Glazov A.N. *Rabochie protsessy pnevmoudarnogo mekhanizma perforatora* [Workflows of pneumoshock mechanism of a punch]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 6, pp. 132–136.
25. Glazov A.N. *Energoberegayushchie konstruksii pnevmoudarnykh burilnykh mashin* [Energy-saving design of pneumopercussion boring machines]. *Gornyy zhurnal*, 2007, no. 1, pp. 76–78.
26. Glazov A.N. *Raschetnye zavisimosti staticheskoy modeli rabochikh protsessov pnevmoudarnogo mekhanizma* [Calculated dependences of a static model of pneumoshock mechanism workflows]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 1, pp. 150–154.
27. Glazov A.N. *Razrabotka pnevmoudarnykh mekhanizmov s ekonomichnym tsiklom raboty* [Development of pneumoshock mechanisms with an economic cycle of work]. *Povyshenie effektivnosti pnevmoudarnykh burovykh mashin* [Increase of efficiency of pneumoshock boring machines]. Novosibirsk, IGD, 1987. pp. 67–69.
28. Glazov A.N., Glazov G.N. *Optimalnaya stepen napolneniya kamery szhatym vozdukhom* [Optimum extent of filling the camera with compressed air]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1988, no. 6, pp. 84–87.
29. Glazov A.N., Karepina E.E. *K sozdaniyu burilnykh mashin s nizkim raskhodom vozdukha* [Development of boring cars with low air consumption]. *Aktualnye problemy mashinostroeniya* [Current problems of mechanical engineering]. Moscow, Mountain book, 2013, pp. 3–5.
30. Gerts E.V., Kreinin G.V. *Raschet pnevmoprivodov* [Calculation of pneumatic actuators]. Moscow, Mechanical Engineering, 1975. 272 p.

Received: 19 January 2015.

УДК 519.63

ПОСТРОЕНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЗДУХОЗАБОРНИКОВ**Галкин Владислав Михайлович,**канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр, доцент каф. геологии
и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов
Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 30. Email: vlg@tpu.ru**Звегинцев Валерий Иванович,**д-р техн. наук, гл. науч. сотр. Института теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
ул. Институтская, 4/1. Email: zvegin@itam.nsc.ru

Актуальность работы. Эффективность преобразования химической энергии топлива в механическое движение сверхзвукового летательного аппарата определяется потерями механической энергии на сопротивление летательного аппарата и потерями полного давления при торможении потока в воздухозаборнике воздушно-реактивного двигателя. Поэтому при прочих равных условиях более энергоэффективным будет тот летательный аппарат, у которого эти потери меньше. Существенное повышение энергоэффективности ожидается от применения осесимметричных изоэнтропических туннельных воздухозаборников. В рамках модели невязкого течения предлагается численная методика построения указанных воздухозаборников с профилированным центральным телом и цилиндрической обечайкой.

Цель работы. В настоящее время отсутствуют способы профилирования осесимметричных изоэнтропических туннельных воздухозаборников, не имеющих элементов, выступающих за цилиндрический корпус летательного аппарата. Поэтому целью исследования является разработка методики построения таких воздухозаборников.

Методы исследования. Используется численная реализация метода характеристик при условии изоэнтропичности течения. Предлагаемая методика состоит из двух задач. В первой задаче от угловой точки строится контур центрального тела с заданной ординатой точки фокусировки характеристик. Во второй задаче производится построение оставшейся части контура до другой угловой точки, при этом используется обращенное течение в кольцевом сопле с цилиндрической обечайкой. Одновременно с решением второй задачи определяется положение обечайки. Центральное тело может содержать на краях по угловой точке. При использовании промежуточной линии тока центральное тело будет гладким.

Результаты. Создана методика для расчета семейства контуров осесимметричных туннельных сверхзвуковых воздухозаборников, геометрические характеристики которых однозначно описываются исходными данными.

Ключевые слова:

Энергоэффективность, сверхзвуковое течение, туннельный осесимметричный воздухозаборник, идеальный совершенный газ, метод характеристик, изоэнтропическое течение.

Введение

Требование энергоэффективности и инженерные ограничения в большинстве случаев приводят к тому, что при проектировании сверхзвуковых летательных аппаратов с воздушно-реактивным двигателем желательно иметь корпус цилиндрической формы с минимальным количеством выступающих элементов [1]. Этому требованию удовлетворяет воздухозаборник, расположенный в носовой части, и туннельный воздухозаборник (ТуВ). Иногда ТуВ называется утопленным воздухозаборником. Пик исследований воздухозаборников, расположенных в носовой части, пришелся на 1950–1960-е гг. [1–5], что связано с переходом авиации на воздушно-реактивные двигатели. В настоящее время осесимметричный воздухозаборник широко применяется в летательных аппаратах. В современной литературе [6–11] его проектирование подробно освещено, поэтому в данной статье этот вопрос не рассматривается.

Что касается ТуВ, по-видимому, первое его упоминание относится к дозвуковому турбореактивному самолету Messerschmitt P.1110 [12, 13], спроектированному в Германии в начале 1945 г. Одна-

ко в производство этот самолет не пошел. Интерес к ТуВ в последующие годы был невысок, прежде всего, из-за больших потерь полного давления, что связано с использованием простейших методик для его построения.

В последнее время интерес к ТуВ начал возрастать, о чем свидетельствуют публикации. В работе [14] предложена конструкция воздухозаборника для дозвукового аппарата, которая не пригодна при сверхзвуковом течении. Рассмотренная в [15] компоновка предназначена для сверхзвуковых скоростей, однако используемый одномерный подход позволяет получить лишь простейшие оценки утопленного воздухозаборника и не может учесть эффекты, связанные с осесимметричностью течения. Тем более что предлагаемый в этой статье подход не позволяет получить однозначный облик ТуВ.

Методика построения ТуВ, рассматриваемая в данной статье, основана на уравнениях, описывающих течение осесимметричного сверхзвукового идеального (невязкого нетеплопроводного) совершенного газа с использованием метода характеристик. При этом для каждого набора исходных

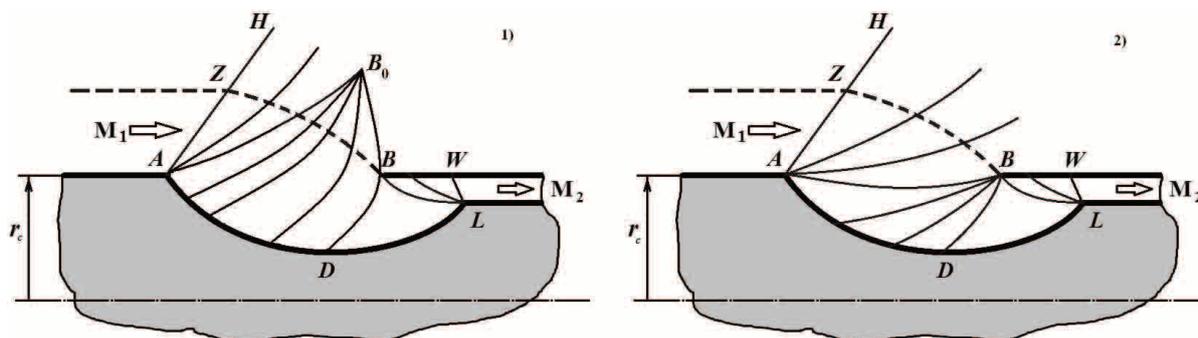


Рис. 1. Схема сверхзвукового осесимметричного туннельного воздухозаборника: (1) точка фокусировки характеристик B_0 находится выше обечайки; (2) точка фокусировки характеристик B находится на обечайке. M_1 – число Маха внешнего равномерного потока; M_2 – число Маха равномерного потока в минимальном сечении ТуВ; AH – начальная равномерная характеристика; A – угловая точка на входе в ТуВ; r_c – радиус цилиндрического корпуса и цилиндрической обечайки; BW – элемент обечайки; ADL – искомый профиль центрального тела; L – угловая точка на центральном теле в минимальном сечении; LW – равномерная характеристика в минимальном сечении; BL – характеристика, замыкающая веер характеристик; BD – характеристика, ограничивающая область течения под обечайкой; ZB – линия тока (граница захватываемой струи)

Fig. 1. Diagram of supersonic ducted axisymmetric air inlet: (1) focusing point of B_0 characteristics is upper than the shell; (2) focusing point of B characteristics is on the shell. M_1 is the Mach number of the external smooth flow; M_2 is the Mach number of the smooth flow in minimal cut set of ducted air inlet; AH is the initial uniform characteristic; A is the angular point at the input of the ducted air inlet; r_c is the radius of cylindrical body and cylindrical shell; BW is the shell element; ADL is the desired profile of the central body; L is the angular point on the central body in minimal cut set; LW is the uniform characteristic in minimal cut set; BL is the characteristic closing the fan of characteristics; BD is the characteristic limiting the flow range under the shell; ZB is the current line (boundary of captured jet)

данных строится единственный профиль воздухозаборника. Окончательный вывод о пригодности формы ТуВ получается после расчета течения в нем вязкого газа аналогично работе [16].

ТуВ предлагаемой схемы имеет цилиндрический корпус и такого же радиуса обечайку. Профиль центрального тела гладкий, за исключением, быть может, начальной и конечной угловых точек, которые можно сгладить путем использования промежуточных линий тока в качестве профиля центрального тела. Рис. 1 демонстрирует два варианта ТуВ с разным положением точек фокусировки.

Схема течения в ТуВ имеет следующий вид. Через отверстие AB внешний равномерный поток, имеющий число Маха M_1 , начинает втекать, одновременно разворачиваясь и ускоряясь около угловой точки A . Далее при обтекании центрального тела на участке AD происходит замедление и поворот потока таким образом, что характеристики, выходящие с центрального тела, пересекаются в заданной точке. Это будет точка B_0 на левом рис. 1 и соответственно точка B на правом рис. 1. При обтекании участка DL газ замедляется и выравнивается так, что на характеристику LW приходит равномерный параллельный поток с числом Маха M_2 . При этом полагается, что течение в ТуВ происходит изэнтропически при числах Маха больше 1.

Построение профиля центрального тела ADL разделяется на две задачи. В первой задаче строится участок AD путем интерполяции параметров вдоль характеристик на найденное значение расхода. Во второй задаче для построения участка DL используется обращенное (повернутое на 180°) течение в кольцевом осесимметричном сопле, схема

которого показана на рис. 2. Эта задача сводится к построению сверхзвукового сопла, состоящего из цилиндрической обечайки и профилированного центрального тела при заданной характеристике BD на выходе и равномерной характеристике LW на входе. Прием обращения течения возможен, поскольку выполняется условие изэнтропичности течения и тип уравнений, описывающих течение, остается гиперболическим.

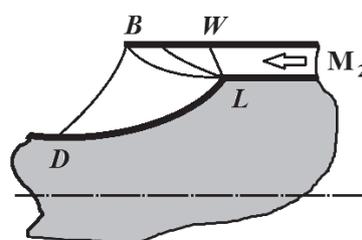


Рис. 2. Элемент туннельного воздухозаборника. Схема участка кольцевого осесимметричного сопла

Fig. 2. Element of the ducted air inlet. Diagram of a section of the ring axisymmetric nozzle

Математическая постановка задачи

Рассматривается осесимметричное сверхзвуковое течение идеального (невязкого нетеплопроводного) совершенного газа. Контур центрального тела находится методом характеристик. Для этого аналогично [17] используются уравнения характеристик C^\pm :

$$\frac{dr}{dx} = \operatorname{tg}(\theta \pm \alpha), \quad (1)$$

условия совместности на характеристиках:

$$d\theta \pm \frac{\cos^2 \alpha}{(k+1)/2 - \cos^2 \alpha} d\alpha \pm \frac{\sin \alpha \sin \theta}{r \cos(\theta \pm \alpha)} dx = 0, \quad (2)$$

где x и r – продольная и поперечная координаты; α – угол Маха; θ – угол наклона вектора скорости к оси x ; k – показатель адиабаты. Расход через элемент характеристики находится из выражения:

$$G = 2 \int_{r_1}^{r_2} \rho w r \frac{\sin \alpha}{\sin(\theta \pm \alpha)} dr, \quad (3)$$

где G – расход через элемент характеристики, лежащий между точками 1 и 2; $w^2 = u^2 + v^2$ – модуль скорости; u и v – проекции вектора скорости на оси

x и r ; ρ – плотность; $M = \frac{1}{\sin \alpha}$ – число Маха. Если $\alpha = \arcsin(1/M) = \text{const}$ и $\theta = 0$, то соотношение (3) приводится к виду:

$$G = M \left(\frac{k+1}{M^2(k-1)+2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} (r_2^2 - r_1^2), \quad (4)$$

В указанных формулах используются безразмерные величины w, u, v, x, r, ρ, G . Они получены следующим образом:

$$w = \frac{w_{dim}}{a_*}, \quad u = \frac{u_{dim}}{a_*}, \quad v = \frac{v_{dim}}{a_*}, \quad x = \frac{x_{dim}}{r_c},$$

$$r = \frac{r_{dim}}{r_c}, \quad \rho = \frac{\rho_{dim}}{\rho_*}, \quad G = \frac{G_{dim}}{\pi \rho_* a_* r_c^2},$$

где индекс dim соответствует размерным величинам; r_c – размерный радиус цилиндрического корпуса; a_* – размерная критическая скорость; ρ_* – размерная критическая плотность. Абсцисса точки A на рис. 1 полагается равной 0.

Неизвестные величины находятся из системы 4-х нелинейных уравнений, которые получены из конечно-разностной записи уравнений (1), (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{r_3^j - r_2}{x_3^j - x_2} = \text{tg}(\theta_{23} - \alpha_{23}), \\ \frac{r_3^j - r_1}{x_3^j - x_1} = \text{tg}(\theta_{13} + \alpha_{13}), \\ \theta_3^j - \theta_1 + \frac{\cos^2 \alpha_{13}}{(k+1)/2 - \cos^2 \alpha_{13}} (\alpha_3^j - \alpha_1) + \\ + \frac{\sin \alpha_{13} \sin \theta_{13}}{r_{13} \cos(\theta_{13} + \alpha_{13})} (x_3^j - x_1) = 0, \\ \theta_3^j - \theta_2 - \frac{\cos^2 \alpha_{23}}{(k+1)/2 - \cos^2 \alpha_{23}} (\alpha_3^j - \alpha_2) - \\ - \frac{\sin \alpha_{23} \sin \theta_{23}}{r_{23} \cos(\theta_{23} - \alpha_{23})} (x_3^j - x_2) = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

здесь индексы 1, 2 соответствуют известным параметрам на характеристиках C^{\pm} ; индекс 3 соответствует искомым параметрам в точке пересечения характеристик; $j=1, 2, \dots$ – номер итерации. Обозначим $p = \{\alpha, \theta, x, r\}$, тогда $p_{13} = (p_1 + p_3^{j-1})/2$, $p_{23} = (p_2 + p_3^{j-1})/2$. По-

лученная система уравнений решалась итерационно. Итерации оканчивались при выполнении условия $\max |p_3^j - p_3^{j-1}| < 10^{-6}$ для $j > 1$. На начальной итерации полагалось $p_3^0 = (p_1 + p_2)/2$. Более подробно схема решения описана в [18] и [19].

Уравнение (3) для вычисления расхода интегрируется численно по формуле средних прямоугольников.

В угловых точках, а также в точках фокусировки уравнение (2) интегрируется в квадратурах и превращается в формулу Прандтля–Майера, которая выполняется как при ускорении, так и при замедлении потока:

$$\theta_1 \pm \omega(\alpha_1) = \theta_2 \pm \omega(\alpha_2),$$

$$\omega(\alpha) = -\alpha + \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \arctg \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \text{tg} \alpha \right),$$

где индексы 1 и 2 соответствуют параметрам до и после разворота.

Алгоритм построения профиля центрального тел

Пусть заданы следующие независимые параметры: N – число узлов сетки на характеристиках; k – показатель адиабаты; M_1 – число Маха во внешнем равномерном потоке; M_2 – число Маха равномерного потока в минимальном сечении; r_h – ордината точки H ; r_{B_0} – ордината точки B_0 . Для $r_{B_0} = 1$ и $r_{B_0} > 1$ алгоритмы различаются.

Случай $r_{B_0} > 1$. Схема построения методом характеристик профиля центрального тела, изображенного на левом рис. 1, имеет следующий вид:

1. По формуле (1) строится равномерная характеристика AH с параметрами в узлах сетки $\alpha = \arcsin(1/M_1)$, $\theta = 0$.
2. От характеристики AH по формулам (5) рассчитываются характеристики в центрированной волне разрежения около точки A , пока очередная характеристика AB_0 не будет иметь значение ординаты в своей крайней точке B_0 , равной r_{B_0} .
3. От характеристики AB_0 по формулам (5) рассчитываются характеристики в центрированной волне около точки B_0 , пока на очередной характеристике B_0D не появится точка со значениями $\theta = 0$ и $r = 1$. Это будет точка B начала обечайки.
4. По формуле (3) вычисляется расход G_{B_0D} через характеристику B_0D .
5. По формуле (3) вычисляется расход G_{B_0B} через характеристику B_0B .
6. Вычисляется расход воздухозаборника $G = G_{B_0D} - G_{B_0B}$.
7. Повторяются пункты 2 и 3. При этом вдоль найденных характеристик вычисляются параметры на искомом контуре. Для этого используется формула (3) и квадратичная интерполяция на расход G .
8. Запоминается α_b – значение угла Маха на характеристике B_0D в точке B .
9. Из формулы (4) рассчитывается ордината минимального сечения:

$$r_L = \sqrt{1 - \frac{G}{M_2} \left(\frac{k+1}{M_2^2(k-1)+2} \right)^{\frac{k+1}{2(1-k)}}}$$

10. По формуле (1) строится равномерная характеристика LW с параметрами в узлах сетки $\alpha = \arcsin(1/M_2)$, $\theta = 0$.
11. От характеристики LW , как показано на рис. 2, по формулам (5) рассчитываются характеристики в центрированной волне разрежения около точки L , пока угол Маха на очередной характеристике LB в точке пересечения с обечайкой не станет равным α_0 . При этом получается длина обечайки от минимального сечения до точки B .
12. В характеристическом треугольнике LBD по характеристикам BD и LB решается задача Гурса. Для этого используются формулы (5).
13. Параметры на искомом контуре LD находятся квадратичной интерполяцией на расход G вдоль характеристик при решении задачи Гурса. Для этого используется формула (3).

Случай $r_{B_0} = 1$. Схема построения методом характеристик профиля центрального тела, изображенного на правом рис. 1, имеет следующий вид:

1. По формуле (1) строится равномерная характеристика AH с параметрами в узлах сетки $\alpha = \arcsin(1/M_1)$, $\theta = 0$.
2. От характеристики AH по формулам (5) рассчитываются характеристики в центрированной волне разрежения около точки A , пока очередная характеристика AB не будет иметь значение ординаты в своей крайней точке B , равной 1.
3. От характеристики AB по формулам (5) рассчитываются характеристики в центрированной волне около точки B , пока на очередной характеристике BD в точке B не выполнится условие $\theta = 0$. Это будет начало обечайки.

4. По формуле (3) вычисляется расход G через характеристику BD . Далее пункты аналогичны пп. 7–13 предыдущего алгоритма, за исключением того, что точки B_0 и B совпадают.

Построение профиля по промежуточной линии тока

Если требуется построить центральное тело без угловых точек, то используются промежуточные линии тока. При этом для однозначного определения нужной линии тока задается относительный расход G_{REL} , который находится из соотношения:

$$G_{REL} = \frac{G_{L_0}}{G_L}, \quad (6)$$

где G_{L_0} – расход между обечайкой и искомой линией тока; G_L – расход между обечайкой и линией тока с угловой точкой. Значению $G_{REL} = 1$ соответствует контур с угловой точкой, значению $G_{REL} < 1$ соответствует гладкий контур. Очевидно, что в последнем случае длина $ТуВ$ будет больше.

Рассмотрим случай, когда необходимо избавиться от угловой точки L и построить участок LD на центральном теле по промежуточной линии тока. На рис. 3 изображена используемая часть расчетной области с обращенным течением.

Хорошо известен прием, приведенный в [17], для построения сопла с равномерными характеристиками на входе и на выходе. Тогда контур без угловой точки в минимальном сечении строится путем сдвига и растяжения некоторой промежуточной линии тока. В рассматриваемом случае необходимо учитывать, что характеристика BD не является равномерной. Поэтому после решения в треугольнике DBL задачи Гурса линия тока из угловой точки L придет в точку D . А линия тока, которая вышла из точки L_0 , придет в точку D_0 , как

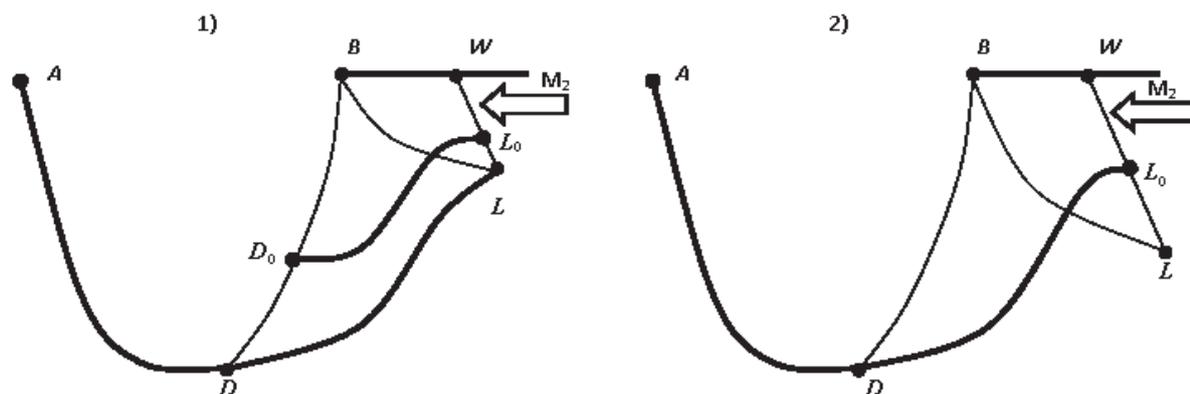


Рис. 3. Схема построения участка на центральном теле по промежуточной линии тока: (1) без смещения угловой точки L и с изломом контура; (2) со смещением угловой точки L и гладким контуром. AD – построенный участок; LD – линия тока с угловой точкой; L_0D_0 – гладкая линия тока; L_0D – гладкая линия тока (искомый участок центрального тела); BW – элемент обечайки; BD – заданная характеристика; BL – характеристика, замыкающая центрированную волну разрежения; LW – равномерная характеристика

Fig. 3. Diagram of plotting a section on the central body by the intermediate current line: (1) without displacement of the angular point L and with the contour fracture; (2) with displacement of the angular point L and with smooth contour. AD is the plotted section; LD is the current line with the angular point; L_0D_0 is the smooth current line; L_0D is the smooth current line (the desired area of the central body); BW is the shell element; BD is the given characteristic; BL is the characteristic closing the centered expansion wave; LW is the uniform characteristic

показано на левом рис. 3. Так как характеристика BD неравномерная, то параметры в точке D_0 и в точке D не будут совпадать, в частности $\theta(D) \neq \theta(D_0)$. Следовательно, растяжение и сдвиг линии тока D_0L_0 в точку D приведет к излому контура в этой точке.

Для построения гладкого контура центрального тела предлагается использовать тот факт, что расход G известен, характеристика LW равномерная и в каждой точке на ней $\alpha = \text{const}$ и $\theta = \text{const}$. Для заданного расхода G положение ординаты r_{L_0} точки L_0 на характеристике LW фиксировано и определяется по формуле (4):

$$r_{L_0} = \sqrt{1 - \frac{G}{M_2} \left(\frac{k+1}{M_2^2(k-1)+2} \right)^{\frac{k+1}{2(1-k)}}}$$

Поэтому необходимо сдвинуть угловую точку так, чтобы положение ординаты r_{L_0} точки L_0 соответствовало некоторой гладкой линии тока, как показано на правом рис. 3. Используя формулы (4) и (6), получим:

$$G_{REL} = \frac{G_{L_0}}{G_L} = \frac{M \left(\frac{k+1}{M^2(k-1)+2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} (1-r_{L_0}^2)}{M \left(\frac{k+1}{M^2(k-1)+2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} (1-r_L^2)} = \frac{1-r_{L_0}^2}{1-r_L^2}$$

Следовательно, новое положение ординаты угловой точки L будет:

$$r_L = \sqrt{1 - \frac{1-r_{L_0}^2}{G_{REL}}}$$

Таким образом, при построении профиля по промежуточной линии тока на заданный расход G_{REL} достаточно пересчитать положение ординаты угловой точки L . При этом алгоритмы, описанные выше, не меняются. На расход воздухозаборника значение G_{REL} не влияет.

Аналогичный прием можно использовать для построения сопла с равномерными характеристиками на входе и на выходе.

Результаты расчетов

На рис. 4 показаны результаты расчета ТуВ для $N=100$, $k=1,4$; $M_1=4$; $M_2=1,2$; $r_h=1,9$; $r_{B_0}=1$; $G_{REL}=1$. Данному варианту соответствует точка фокусировки B , лежащая на обечайке. В качестве интересного факта отметим, что для широкого диапазона исходных данных характеристика AB является параболой.

Для сравнения на рис. 5 показаны результаты расчетов для $N=100$, $k=1,4$; $M_1=4$; $M_2=1,2$; $r_h=1,9$; $r_{B_0}=1,5$; $G_{REL}=1$. Данному варианту соответствует точка фокусировки B_0 , лежащая выше обечайки.

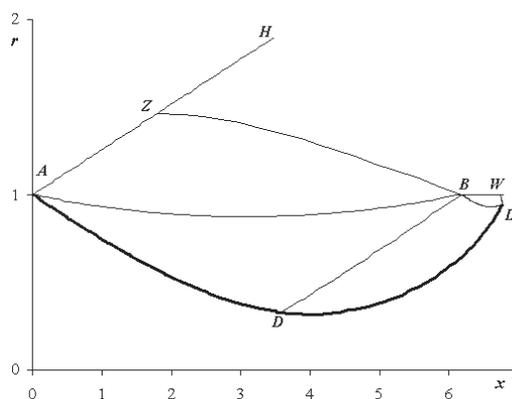


Рис. 4. Результат расчета контура центрального тела для ТуВ с точкой фокусировки на обечайке. L, A – угловые точки; B – точка фокусировки и начало обечайки; AH – равномерная характеристика во внешнем потоке; LW – равномерная характеристика в минимальном сечении; ZB – граница захватываемой струи; AB – характеристика, пересекающая обечайку; DBL – область решения задачи Гурса; ADL – контур центрального тела; BW – элемент обечайки

Fig. 4. Results of designing the central body contour for the ducted air inlet with the focusing point on the shell. L, A are the angular points; B is the focusing point and the beginning of the shell; AH is the uniform characteristic in the external flow; LW is the uniform characteristic in the minimal cut set; ZB is the boundary of the captured jet; AB is the characteristic crossing the shell; DBL is the Goursat problem space; ADL is the central body contour; BW is the shell element

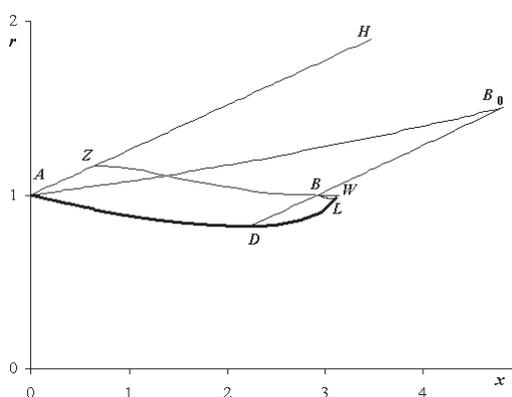


Рис. 5. Результат расчета контура центрального тела для ТуВ с точкой фокусировки выше обечайки. L, A – угловые точки; B_0 – точка фокусировки; B – точка начала обечайки; AH – равномерная характеристика во внешнем потоке; LW – равномерная характеристика в минимальном сечении; ZB – граница захватываемой струи; AB_0 – первая характеристика, приходящая в точку фокусировки; B_0BD – последняя характеристика, приходящая в точку фокусировки; DBL – область решения задачи Гурса; ADL – контур центрального тела; BW – элемент обечайки

Fig. 5. Results of designing the central body contour for the ducted air inlet with the focusing point over the shell. L, A are the angular points; B_0 is the focusing point; B is the point of the beginning of the shell; AH is the uniform characteristic in the external flow; LW is the uniform characteristic in the minimal cut set; ZB is the boundary of the captured jet; AB_0 is the first characteristic moving to the focusing point; B_0BD is the last characteristic moving to the focusing point; DBL is the Goursat problem space; ADL is the central body contour; BW is the shell element

В таблице представлены результаты расчетов. Они показывают, что максимальному расходу ТуВ при прочих равных параметрах соответствует $r_{B_0}=1$ – точка фокусировки, лежащая на обечайке. Расход G вычислялся по формуле (3). Исходные данные: $N=100$, $k=1,4$; $M_1=4$; $M_2=1,2$; $r_h=1,9$. Параметр G_{REL} на полученные результаты не влияет.

Таблица. Влияние положения точки фокусировки r_{B_0} на расход G и радиус минимального сечения r_l туннельного воздухозаборника

Table. Influence of the focusing point r_{B_0} on the flow G and radius of minimal cut set r_l of the ducted air inlet

| r_{B_0} | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| G | 0,106 | 0,091 | 0,076 | 0,062 | 0,047 | 0,033 | 0,021 | 0,011 | 0,003 |
| r_l | 0,944 | 0,952 | 0,960 | 0,968 | 0,975 | 0,983 | 0,989 | 0,995 | 0,998 |

Отметим, что можно провести оптимизацию полученного профиля под выполнение опреде-

ленных конструктивных требований, например, учесть влияние вязкости, как это было сделано при создании профилированных гиперзвуковых сопел для аэродинамической трубы АТ-303 [20].

Заключение

На основе метода характеристик разработана методика построения осесимметричного сверхзвукового туннельного воздухозаборника. Его входное отверстие размещено на боковой поверхности летательного аппарата и не имеет элементов, выступающих во внешний поток. Геометрические характеристики предложенного воздухозаборника единственным образом зависят от исходных данных. Проведенные расчеты показали, что при прочих равных исходных данных положение точки фокусировки на обечайке обеспечивает максимальный расход через предлагаемый воздухозаборник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
2. Connors J.F., Woollett R.R. Characteristics of flow about axially symmetric isentropic spikes for nose inlet at Mach number 3.85. – NACA: Reports and Memoranda no. E54F08. – 1954. – 53 p. URL: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930088579.pdf> (дата обращения: 20.01.2015).
3. Wallace F.D., Scherrer R. Aerodynamic principles for the design of jet engine induction systems // National advisory committee for aeronautics. – Washington, February 27, 1956. – 185 p. URL: https://archive.org/stream/nasa_techdoc_19650013440/19650013440#page/n0/mode/2up (дата обращения: 20.01.2014)
4. Kennedy E.C. Calculation of axisymmetric isentropic spike surfaces // J. Aerospace Sci. – 1958. – V. 25. – № 7. – P. 463–464.
5. Goldsmith E.L., Smith G.V.F. The performance of some axisymmetric isentropic centrebody intakes designed for Mach numbers of 2.48 and 3.27. – London: Reports and Memoranda no. 3585. – 1966. – 83 p. URL: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/arc/rm/3585.pdf> (дата обращения: 20.01.2015).
6. Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов / под ред. Г.С. Бюшгенса. – М., Пекин: ИО ЦАГИ, Авиа-издательство КНР, 1995. – 772 с.
7. Артёмов О.А. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (расчет характеристик). – М.: Компания Спутник+, 2006. – 374 с.
8. Variational analysis and aerospace engineering // Springer Optimization and Its Applications / eds. G. Buttazzo, A. Frediani. – New York, Springer-Verlag, 2009, V. 33. – 518 p.
9. Tactical Missile Aerodynamics: General Topics // Series: Progress in Astronautics and Aeronautics / Ed. M.J. Hensch. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992. V. 141. – 731 p.
10. Zarchan P. Tactical and strategic missile guidance // Series: Progress in Astronautics and Aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. V. 239. – 1026 p.
11. Critical technologies for hypersonic vehicle development. Lecture Series. 2004, 546 p. URL: <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-EN-AVT-116> (дата обращения: 20.01.2015).
12. Ludwig Karl-Heinz. Technik und ingenieure im dritten reich. – Dusseldorf: Droste, 1974. – 544 p.
13. Christopher J. The Race for Hitler's X-Planes: Britain's 1945 Mission to Capture Secret Luftwaffe Technology. – UK: The History Press, 2013. – 224 p.
14. Малогабаритный туннельный воздухозаборник воздушно-реактивного двигателя дозвукового летательного аппарата: пат. Рос. Федерация № 134516; заявл. 19.04.13; опубл. 20.11.13. Бюл. № 32. – 2 с.
15. Замарахин В.А., Кирюхин И.В., Швыкин Ю.С. Способ повышения эффективности утолщенного воздухозаборника // Оборотная техника. – 2014. – № 10. – С. 15–19.
16. Проектирование туннельных воздухозаборников изозетропического сжатия для осесимметричных летательных аппаратов / Е.Я. Брагунцов, Д.А. Внучков, В.М. Галкин, В.И. Звезгинцев // Авиация и космонавтика – 2014: Тезисы докладов 13 Междунар. конф. – М.: 17–21 ноября 2014. – СПб.: Мастерская печати, 2014. – С. 111–113.
17. Theory of optimum aerodynamic shapes / ed. A. Miele. – New York, London: Academic press, 1965. – 478 p.
18. Galkin V.M., Volkov Yu.S. Elements of Nozzle Design Optimization / In: Encyclopedia of Mathematics Research / eds. Mathias J.D., Cleaves S.I. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2012. – V. 3. – P. 843–875. URL: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=47969 (дата обращения: 20.01.2015).
19. Волков Ю.С., Галкин В.М. О выборе аппроксимаций в прямых задачах построения сопла // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 923–936.
20. Численное проектирование многорежимных осесимметричных гиперзвуковых сопел аэродинамической трубы / С.М. Аульченко, В.М. Галкин, В.И. Звезгинцев, А.Н. Шиплюк // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. – № 2. – С. 90–97.

Поступила 29.01.2015 г.

UDC 519.63

FORMING OF DUCTED AXISYMMETRIC SUPERSONIC AIR INLETS

Vladislav M. Galkin,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. Email: vlg@tpu.ru

Valery I. Zvegintsev,

Dr. Sc., Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 4/1, Institutskaya
street, Novosibirsk, 630090, Russia. Email: zvegin@itam.nsc.ru

Relevance of the research. The efficiency of fuel chemical energy conversion into mechanical motion of a supersonic aircraft is determined by energy losses due to aerodynamic drag of the aircraft and total pressure losses in the air inlet of jet engine. Therefore, *ceteris paribus* the aircraft with lower level of these losses will be more energy efficient. Significant increase in energy efficiency is expected from the use of axisymmetric isentropic ducted air inlets. In the framework of the non-viscous flow, a numerical method is offered for these air inlets with a contoured central body and a cylindrical shell designing.

The main aim of the study. Currently there are no designing methods for axisymmetric isentropic ducted air inlets without elements projecting over a cylindrical body of the aircraft. Therefore, the aim of the study is to develop a methodology for designing such inlets.

The methods used in the study. Numerical implementation of the characteristics method for isentropic flow is used. The proposed method involves the decision of two problems. In the first problem a flow line around the given focus point of characteristics is plotted which starts at a break point of central body. In the second problem the rest of the contour is calculated using the reversed flow in an annular nozzle with a cylindrical shell. Simultaneously with the decision of the second problem, the position of the shell is determined. The central body can contain angular points at the edges of the contour. If we use an intermediate flow line then the central body will be smooth.

The results. The authors developed the methodology for calculating different axisymmetric supersonic air inlet contours, which geometrical characteristics are uniquely described by the original data.

Key words:

Energy efficiency, supersonic flow, ducted axisymmetric air inlet, ideal perfect gas, method of characteristics, isentropic flow.

REFERENCES

1. Abramovich G. N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 824 p.
2. Connors J.F. Woollett R.R. Characteristics of flow about axially symmetric isentropic spikes for nose inlet at Mach number 3.85. NACA, Reports and Memoranda no. E54F08, 1954, 53 p. Available at: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930088579.pdf> (accessed 20 January 2015).
3. Wallace F.D., Scherrer R. Aerodynamic principles for the design of jet engine induction systems. *National advisory committee for aeronautics*. Washington, February 27, 1956. 185 p. Available at: https://archive.org/stream/nasa_techdoc_19650013440/19650013440#page/n0/mode/2up (accessed 20 January 2015).
4. Kennedy E.C. Calculation of axisymmetric isentropic spike surfaces. *J. Aerospace Sci.*, 1958, vol. 25, no. 7, pp. 463–464.
5. Goldsmith E.L., Smith G.V.F. The performance of some axisymmetric isentropic centrebody intakes designed for Mach numbers of 2.48 and 3.27. London, Reports and Memoranda no. 3585, 1966, 83 p. Available at: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/arc/rm/3585.pdf> (accessed 20 January 2015).
6. *Aerodinamika i dinamika poleta magistralnykh samoletov* [Aerodynamics and flight dynamics of aircraft]. Ed. G. S. Byushgens. Moscow, Peking, TSAGI Publ., Avia-izdatelstvo China, 1995. 772 p.
7. Artemov O.A. *Pryamotochnye vozdušno-reaktivnye dvigateli (raschet kharakteristik)* [Ramjet-rocket engines (calculation of characteristics)]. Moscow, Kompaniya Sputnik+, 2006. 374 p.
8. *Variational Analysis and Aerospace Engineering // Springer Optimization and Its Applications*. Eds. G. Buttazzo, A. Frediani. New York, Springer-Verlag, 2009, vol. 33, 518 p.
9. Tactical Missile Aerodynamics: General Topics. Series: Progress in Astronautics and Aeronautics. Ed. M.J. Hensch. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992, vol. 141, 731 p.
10. Zarchan P. Tactical and Strategic Missile Guidance. Series: Progress in Astronautics and Aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013, vol. 239, 1026 p.
11. Critical technologies for hypersonic vehicle development. Lecture Series. 2004, 546 p. Available at: <https://www.cso.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-EN-AVT-116> (accessed 20 January 2014).
12. Ludwig Karl-Heinz. *Technik und Ingenieure im Dritten Reich*. Dusseldorf, Droste, 1974. 544 p.
13. Christopher J. *The Race for Hitler's X-Planes: Britain's 1945 Mission to Capture Secret Luftwaffe Technology*. UK, The History Press, 2013. 224 p.
14. Chevagin A.F., Tretyakov V. F., Kazhan A.V., Kazhan V.G. *Malogabaritnyy tunnelnyy vozdukhobornik vozdušno-reaktivnogo dvigatelya dozvukovogo letatel'nogo apparata* [Small-sized tunnel RAM intake subsonic jet aircraft]. Patent RF, no 134516, 2013.
15. Zamarakhin V.A., Kiryukhin I.V., Shvykin Yu.S. Sposob povysheniya effektivnosti utoplennogo vozdukhobornika [Way to improve the efficiency of recessed air intake]. *Oboronnaya tekhnika*, 2014, no. 10, pp. 15–19.
16. Braguntsov E.Ya., Vnuchkov D.A., Galkin V.M., Zvegintsev V.I. Proektirovanie tunnelnykh vozdukhobornikov izoentropicheskogo szhatiya dlya osesimmetrichnykh letatelnykh apparatov [Design of tunnel axisymmetric diffusion aircraft]. *Tezisy dokladov 13 Mezhdunarodnoy konferentsii. Aviatsiya i kosmonavtika-2014* [Proc. 13th Int. Symp. Aviation and Cosmonautics – 2014]. Moscow, 2014. pp. 111–113.
17. *Theory of optimum aerodynamic shapes*. Ed. by A. Miele. New York, London, Academic press, 1965. 478 p.
18. Galkin V.M., Volkov Yu.S. Elements of Nozzle Design Optimization. In: *Encyclopedia of Mathematics Research*. Eds. Mathias J.D., Cleaves S.I. New York, Nova Science Publishers, Inc.,

- 2012, vol. 3, pp. 843–875. Available at: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=47969 (accessed 20 January 2015).
19. Volkov Yu.S., Galkin V.M. On the choice of approximations in direct problems of nozzle design. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2007, vol. 47, no. 5, pp. 882–894. Available at: http://portal.tpu.ru/SHARED/v/VLG/eng/Tab4/Tab/volkov_galkin_2007.pdf (accessed 20 January 2015).
20. Aulchenko S.M., Zvegintsev V.I., Galkin V.M., Shilyuk A.N. Numerical design of multimodal axisymmetric hypersonic nozzles for wind tunnels. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, vol. 51, no. 2, pp. 218–225. Available at: http://portal.tpu.ru/SHARED/v/VLG/eng/Tab4/Tab/jamtp_2010.pdf (accessed 20 January 2015).

Received: 29 January 2015.

УДК 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СЕТИ

Никонец Леонид Алексеевич,

д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: nykonets@gmail.com

Никонец Алексей Леонидович,

аспирант кафедры «Электрические станции» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: nykonets@gmail.com

Венгер Владимир Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: vol.venher@gmail.com

Актуальность работы. При обосновании требуемых уровней продольной (витковой) изоляции трансформаторов явление внутреннего резонанса не учитывалось ни одним директивным документом в мире. Изучение этого явления и рекомендации, которые могут быть сформулированы, позволят повысить надежность работы трансформаторов.

Цель работы: сформулировать основы моделирования, гарантирующие адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети.

Методы исследования: частотные методы натурного эксперимента и анализа электрических цепей.

Результаты. Сформулированы основные требования к моделям: 1. Расчетная схема должна содержать элементы, моделирующие магнитопровод, изоляцию, обмотки или их части и их взаимосвязи с общим магнитным потоком. 2. Расчетная схема должна отражать электромагнитные процессы при действии на трансформатор напряжений произвольной формы и частоты. 3. Поскольку составляющие общего магнитного потока (магнитный поток в магнитопроводе и магнитный поток вне магнитопровода) по-разному влияют на параметры электромагнитных процессов в трансформаторе, эти составляющие в модели должны учитываться отдельно.

Выводы. При резонансе трансформатора с линейными параметрами с емкостью, в том числе сети, в которую трансформатор передает энергию, распределение напряжения вдоль обмотки и между обмотками нелинейно. Задача моделирования – определить кратности перенапряжения на наиболее опасном участке обмотки. Под действием стороннего магнитного потока в отключенных обмотках и их частях развиваются резонансные процессы с частотой, зависящей от параметров обмоток или их частей, что при моделировании должно быть учтено организацией соответствующих взаимоиנדуктивных связей по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Разработан метод моделирования взаимоиנדуктивных связей между обмотками и их частями, который учитывает нарушение принципа взаимности взаимоиנדукции в реальных трансформаторах. Разработан метод учета нелинейности магнитопровода, при действии на трансформатор перенапряжений сети. Разработан метод экспериментального определения составляющих комплексного сопротивления обмоток и их частей для заданного режима работы и метод реализации частотных характеристик составляющих комплексного сопротивления. Стандартные программные комплексы, с помощью которых реализуются разработанные модели, в том числе и такие, которые учитывают геометрию трансформатора, не приспособлены для реализации подходов, изложенных в настоящих выводах. Проблема повышения надежности трансформаторов при возникновении резонансных процессов – это проблема не CIGRE, а IEC.

Ключевые слова:

Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, частотный метод исследования, модель.

Анализ результатов выполненных исследований по изучению явлений внутреннего резонанса и методам его моделирования

В 2014 г. рабочая группа А2/С4.39, обобщая результаты проведенных в мире исследований, выпустила уникальную монографию «Электрические переходные взаимодействия между трансформаторами и энергосистемой» (ч. 1, 2) [1, 2] от имени всей рабочей группы. Ее уникальность состоит в том, что число авторов из разных стран составило 24 плюс 13 авторов-корреспондентов.

Всего 37 авторов. Часть 1 (экспертиза) [1] насчитывает 175 страниц, а часть 2 (истории успеха) – 123 страницы [2]. Всего 298 страниц. Эта монография имеет 402 библиографические ссылки! Поскольку в монографии не указан вклад отдельных авторов, ее выводы следует признать выводами всей рабочей группы. В одной трети из 402 публикаций принимали участие авторы [1, 2]. Таким образом имеется представительная выборка авторов, которая отражает мнение ученых всего мира за 50 лет исследований. В [1] авторы следую-

щим образом сформулировали основные выводы своей работы:

1. Контрольные испытания, содержащиеся в стандартах, не полностью соответствуют всем типам переходных процессов, возникающих в эксплуатации. Использование стандартной волны грозового импульса не соответствует реальным воздействиям в случае возникновения в эксплуатации высокочастотных колебательных процессов, например, при наличии в цепи питания кабелей, коммутации конденсаторов и т. д.
2. Производители и покупатели трансформаторов предложили, чтобы проблемы высокочастотных колебаний были рассмотрены в стандартах на импульсные воздействия. Это не тот случай. Не все опасные воздействия известны.
3. Другие рабочие группы решили эту проблему [3–15], но она по-прежнему требует внимания.
4. Для определенной конфигурации сети существует высокая вероятность того, что система может содержать, при переходных процессах, колебательные волны напряжения, частота которых будет совпадать с частотами собственных колебаний в трансформаторе. Эти внутренние перенапряжения могут превышать допустимые для изоляции значения, даже в случаях, когда амплитуда падающего напряжения гораздо ниже уровня защиты от перенапряжения. Что касается конструкции трансформатора, то этот тип уязвимости не может быть предотвращен.
5. Трансформатор влияет на форму волны переходного напряжения на выводах из-за частотной зависимости входного сопротивления. Поэтому при моделировании следует применять соответствующую модель. Есть несколько различных подходов и уровней сложности для получения таких моделей. Производители, как правило, создают модели для изучения внутренних перенапряжений в обмотках на основе информации о геометрии и свойств материалов. Другие создают модели на основе измерений на клеммах. Большинство моделей совместимы с распространенными программами моделирования электрических цепей.
6. Для представления прилегающей энергосистемы в исследованиях трансформаторных перенапряжений стандартные средства моделирования обеспечивают достаточно точными моделями для большинства ситуаций.
7. Стандартный подход для оценки последствий внутренних перенапряжений в трансформаторе заключается в использовании инструментов анализа и информации о конструкции, которая доступна только производителю. Системная программа для трансформатора может сделать первоначальную оценку, используя так называемый фактор серьезности частотных характеристик (частотной области), который получают симуляциями во времени (временной области) на модели трансформаторов (созданной относительно выводов). Этот подход (FDSF) может быть использован для обоснования расчетных видов перенапряжений и в анализе отказов. В сочетании с онлайн мониторингом он также может быть использован в качестве индикатора увеличенных рисков при воздействии перенапряжений.
8. Повторяющиеся перенапряжения и старение снижают способность изоляции выдерживать перенапряжения, что должно учитываться при проектировании изоляции. Аварийные характеристики изоляции из твердых материалов при высокочастотных воздействиях неизвестны и заслуживают дальнейшего изучения.
9. Тринадцать тематических исследований представлены в части 2 «Истории успеха», которые демонстрируют ситуации, когда переходные процессы приводят к чрезмерным перенапряжениям в трансформаторах. Эти исследования ясно показывают важность рассмотрения не только амплитуды, но и частоты воздействующих перенапряжений.
10. Для оценки эффективности моделей типа «белый ящик» при расчетах распределения внутренних напряжений различных типов переходных процессов относительно выводов обмоток был использован «фиктивный» (виртуальный) трансформатор с заданной геометрией конструкции. Результаты моделирования получены от 11 независимых сторон (производители, университеты, консультанты). Эти результаты дали хорошее совпадение максимальных значений внутренних перенапряжений, но некоторые различия были обнаружены в формах образовавшихся волн.
11. Резонансные частоты сильно зависят от значений индуктивностей, взаимоиндуктивностей и емкостей, которые были использованы для моделирования «фиктивного трансформатора». Некоторые участники, выполняя расчеты, использовали одни и те же значения индуктивностей и емкостей. В этом случае идентичные результаты были получены, используя различные комплексы программного обеспечения.
12. Производители должны улучшить свои модели для того, чтобы добиться более точных значений максимума внутренних перенапряжений по всей длине обмотки, а следовательно, и во временной области. Для улучшения моделей требуются более эффективные методы расчета индуктивностей и емкостей, эквивалентирующих обмотки трансформатора.
13. Хорошая работа внешней системы и практика проектирования могут помочь предотвратить повреждения трансформаторов, связанные с переходными процессами, но для этого очень важно, чтобы структура изоляции трансформаторов учитывалась при расчете переходных процессов. Это может быть достигнуто путем записи в технические условия при изготовлении специальных дополнительных требований (например, специальные испытательные на-

пряжения). Это требует сотрудничества между производителем и покупателем. При таком сотрудничестве желательно, чтобы производители представляли потребителю относительно выводов трансформатора соответствующий эквивалент (модель), чтобы потребитель мог выполнять исследование переходных процессов. Результатом таких исследований могут быть рекомендации небольших изменений в системе питания, которые позволят исключить возможность возбуждения в трансформаторе внутренних резонансов.

Поскольку монография [1, 2] представляет по сути обобщение всех исследований в мире, и ее содержание напрямую коррелируется с темой настоящего исследования, представляется целесообразным не ограничиваться выводами, которые сделали авторы, но дополнить их своими впечатлениями и замечаниями, появившимися после внимательного изучения всего текста.

1. Монография представляет хорошо сбалансированный текст, в котором рассмотрены все аспекты проблемы. Трудно представить 37 авторов из разных стран, у которых единая точка зрения. Чувствуется влияние редакторов, фамилии которых не указаны.
2. Настойчиво пропагандируется тезис о преимуществе производителя, который по сравнению с потребителем имеет доступ к геометрии трансформатора, а следовательно, только он способен сделать правильные выводы. Но внутренние сомнения у анонимных редакторов все-таки остаются. Выразителем этих сомнений является раздел 8, в котором приводятся параметры «фиктивного трансформатора» и излагаются результаты проведенного тестирования результатов расчетов, сделанных представителями 12 ведущих в трансформаторостроении (раздел 8.3) стран. Чего стоит, например, вывод 11 авторов [1, 2]. Из него можно понять, что не существует строго обоснованных методов определения значений индуктивности и емкости для моделирования обмоток. Если этот вывод прочитать совместно с выводом 12, то при желании можно сомневаться в достоверности результатов. Ведь такое тестирование потребовало весьма серьезных материальных затрат.
3. Рекомендации [1, 2] как рабочей группы CIGRE, с учетом ее статуса, относятся исключительно к сверхмощным трансформаторам на сверхвысокие напряжения, хотя естественно было бы предположить, что характер электромагнитных процессов у трансформаторов на любые номинальные напряжения, вплоть до трансформаторов распределительных сетей 10/0,4 кВ, одинаковый. С учетом сделанного выше замечания, трудно согласиться с утверждениями о том, что другие рабочие группы решили эту проблему (вывод 3 монографии), что этот тип воздействия не может быть предотвращен изменением конструкции трансформатора

(вывод 4), что небольшие изменения в системе питания позволят исключить возможность возбуждения в трансформаторе внутренних резонансов (вывод 13).

4. Утверждение, с которого начинается Резюме [1. С. 6] «Ряд диэлектрических повреждений трансформаторов были отнесены к перенапряжениям как причине, даже в случаях, когда изоляция и ее координация с защитными устройствами была выполнена хорошо. Рабочая группа CIGRE PG A2/C4.39 была сформирована с целью выяснения причин таких неудач, и рекомендация мер по исправлению положения, в контексте высокочастотных переходных процессов и практики выбора изоляции, выглядит, как попытка подменить проблему. Не решив одной, сформулировать другую (под высокочастотными переходными процессами авторы [1, 2] понимают частоты больше 1 МГц), может быть не менее важную.
5. В [1. С. 46–47], раздел 4.3.1 «Характеристика поведения трансформатора» указывается, что наиболее полную информацию можно получить с помощью матрицы полных проводимостей, которые определяют соотношения между токами и напряжениями на клеммах трансформатора

$$i(\omega) = Y(\omega)v(\omega). \quad (4.3)$$

Далее указано: «стандартные измерительные системы FRA непосредственно не применимы для измерения $Y(\omega)$ »... «В принципе, можно было бы измерить матрицу передачи напряжения от каждого вывода к другим выводам, на практике, однако, это невозможно, потому что входной импеданс сетевого анализатора 50 Ом изменит передаточные функции напряжения».

В разделе 4.3.5 (стр. 51), учитывая опыт, накопленный авторами при синтезе матрицы $Y(\omega)$, рекомендуются следующие этапы проверки:

- убедитесь, что измеренная матрица $Y(\omega)$ симметрична;
- убедитесь, что измеренная матрица $Y(\omega)$ пассивна;
- сравните экспериментальный результат с результатом, полученным с помощью модели.

Указанные требования соответствуют необходимости выполнения известного из ТОЭ принципа взаимности взаимных проводимостей в линейных цепях. Наличие специального подраздела 4.3.5 в монографии [1, 2] указывает на то, что авторы [1, 2] при синтезе матрицы $Y(\omega)$ регулярно сталкиваются с соответствующими сложностями.

6. В целом [1, 2] представляются нам как добросовестное уточнение ранее известных подходов, которые за более чем 50 лет исследований не сумели обеспечить качественный скачок наших знаний и решить проблемы повышения надежности работы витковой изоляции. За все увеличивающейся сложностью расчетов, возможность которых предоставляет нам «Компьютерная Эра», теряется понимание физики

процессов внутреннего резонанса. В частности, не ясно, что же в конце концов с чем резонирует? Какие условия должны сложиться, и на каких частотах возникнут резонансные явления? Это из ряда вон выходящее или банальное повседневное явление?

С 2005 г. начинаются исследования внутреннего резонанса на Украине [16].

В [17] впервые установлен механизм возникновения перенапряжений между частями обмотки трансформатора – резонанс между напряжениями взаимной индукции частей обмотки, который обусловлен обменом мощности между частями обмотки по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. При появлении любых перенапряжений со стороны сети внутри трансформатора всегда развиваются перенапряжения, которые принципиально будут иметь значения большие, чем приложенные.

В [18] исследовалось распределение напряжений вдоль обмотки высокого напряжения (ВН) в диапазоне частот 50–100000 Гц и обоснована необходимость использования для учета влияния взаимной индукции в объекте с распределенными параметрами методами теории цепей наряду с классическими параметрами (элементами) электрической цепи R, L, C дополнительных параметров $-R, -L, -C$.

В [19] исследованы процессы при действии на обмотку стороннего магнитного потока. Показано впервые, что сторонний магнитный поток способен в отключенной обмотке вызывать резонансные процессы.

В [20] сформулированы причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обоснованы возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

Задача исследований

Сформулировать основы моделирования, гарантирующие адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети.

Изложение основных результатов исследования

Основные требования к моделям

При обосновании требований к параметрам расчетной схемы и её элементам необходимо учесть следующие условия:

1. Расчетная схема должна содержать элементы, моделирующие магнитопровод, изоляцию, обмотки или их части и их взаимосвязи с общим магнитным потоком.
2. Расчетная схема должна отражать электромагнитные процессы при действии на трансформатор напряжений произвольной формы и частоты.
3. Поскольку составляющие общего магнитного потока (магнитный поток в магнитопроводе и магнитный поток вне магнитопровода) по-раз-

ному влияют на параметры электромагнитных процессов в трансформаторе, эти составляющие в модели должны учитываться отдельно.

Метод моделирования резонансных процессов в обмотках трансформатора под действием стороннего магнитного потока

С видом перенапряжений, задекларированном в заголовке, электроэнергетика еще не сталкивалась по причине его неизвестности. Соответственно отсутствуют любые предложения о возможных методах его моделирования. Хотя выполнить экспериментальные исследования мог бы любой студент в любом вузе, самое трудное, что надо было сделать, это догадаться, что такой эксперимент надо провести. Сказанное выше в равной степени относится и к экспериментально установленному факту нарушения принципа взаимности взаимной индукции, уже начиная с частоты 50 Гц. Реальное влияние электромагнитного поля (не отдельно магнитного и отдельно электрического) оказалось много сложнее, чем предполагали исследователи. Без описания и моделирования этого явления невозможно в будущем обеспечить надежную работу продольной изоляции трансформатора в эксплуатации. Традиционная модель [1, 2] предусматривает наличие магнитной связи между обмотками и магнитопроводом, а также сопротивлений рассеяния обмоток трансформатора. Опыты, результаты которых приведены в [19], показывают, что на высоких частотах магнитная связь между обмотками и их частями осуществляется в основном по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Без моделирования этих связей нельзя признать ни одну модель адекватной.

Модели сопротивлений рассеяния по своему определению работают, если через них протекает ток, что возможно, если к модели обмотки подключен источник напряжения или нагрузка. На величину стороннего магнитного потока, пересекающего обмотку, модели сопротивлений рассеяния реагировать не имеют права!

Из изложенного следует, что стандартные модели трансформаторов должны быть дополнены подмоделями, которые отражают наличие взаимноиндуктивных связей между обмотками и их частями. Главный вопрос – сколько таких связей необходимо, чтобы отобразить все опасные для продольной изоляции воздействия.

Для ответа на сформулированный вопрос необходимо проанализировать конструкцию трансформатора и его возможные нормальные и аварийные режимы работы. Если взять за основу трансформатор распределительной сети, для которого были проведены основные экспериментальные исследования, то структурная схема модели трансформатора представлена на рис. 1. Здесь: M_{1i} – взаимная индукция между i -м участком модели обмотки ВН и обмоткой низкого напряжения (НН) соответствующих фаз; M_{2i} – взаимная индукция между i -м участком модели обмотки ВН одной фазы и

моделью обмотки ВН другой фазы; M_3 – взаимная индукция между моделями обмотки НН разных фаз; M_4 – взаимная индукция между регулировочной и основной частью моделей обмотки ВН соответствующих фаз; M_5 – взаимная индукция между моделью регулировочной части обмотки ВН и моделью обмотки НН соответствующих фаз; M_6 – взаимная индукция между моделями регулировочных частей обмотки ВН соответствующих фаз; M_7 – взаимная индукция между моделями основной части обмотки ВН и обмоткой НН.

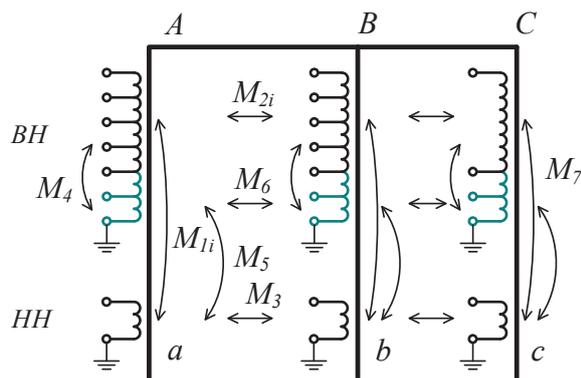


Рис. 1. Структурная схема модели трансформатора

Fig. 1. Structural diagram of a transformer model

Трансформатор может находиться в режиме холостого хода. Для этого режима необходимо отобразить возможность появления перенапряжений на отключенной обмотке НН при помощи модели взаимной индукции M_7 . Если в режиме холостого хода не используются витки регулировочной части обмотки ВН для моделирования возможных перенапряжений на них предусмотрена взаимная индукция M_4 . Если предполагается возможность включения трансформатора на холостой ход со стороны обмотки НН, должны быть использованы модели M_{1i} , M_5 .

Кроме упомянутых режимов следует считаться и с аварийным. Такие трансформаторы обычно подключают к сети через предохранители. Наличие режима работы трансформатора при перегоревших одном или двух предохранителях требует учета взаимных индуктивностей M_{2i} , M_3 .

Наличие взаимных индуктивных связей может привести к большим перенапряжениям на отключенных обмотках или на их частях, при включении трансформатора на холостой ход из-за бросков тока холостого хода, которые могут превышать номинальные значения. Этот вопрос подлежит дальнейшему изучению.

Значимость каждой из перечисленных взаимных индуктивных связей и необходимость учета в модели должна быть установлена по результатам экспериментальных исследований в каждом конкретном случае (с учетом цели проводимых исследований). Важно подчеркнуть, что экспериментально определенные значения M для разных частот напряжения источника питания, являются параметрами модели, а не оригинала. Эти значения M

корректно отражают сложнейшие резонансные процессы в отключенных обмотках оригинала под действием магнитных потоков, сформированных токами в других обмотках, в терминах и представлениях (понятиях) теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами. Сами экспериментально определенные частоты, для которых значения M достигают максимума, уже несут важную практическую информацию об опасных частотах.

Учет нарушения принципа взаимности взаимной индукции

В [20] на основе экспериментов обосновано нарушение принципа взаимности взаимной индукции в реальных трансформаторах, что автоматически приводит к нарушению принципа взаимности взаимных проводимостей в линейных цепях. В свою очередь это означает, что требования раздела 4.3.5 [1] о необходимости формирования матрицы проводимостей $Y(\omega)$, как симметричной, так и пассивной, некорректны, а следовательно, все модели, отвечающие требованиям раздела 4.3.5 [1] – неадекватны.

На рис. 2 представлен фрагмент модели реального трансформатора, отражающий наличие взаимной индуктивной связи между конкретными обмотками или их частями, при условии $X_{m12} \neq X_{m21}$. Магнитную связь обмоток 1 и 2 с потоком, который замыкается по магнитопроводу, обеспечивает модель реального трансформатора. Магнитную связь между обмоткой – 1, по которой протекает ток I_1 , и обмоткой – 2 по путям замыкания потока вне магнитопровода обеспечивает идеальный трансформатор – 1 с нагрузкой $X_{m12}(\omega)$. Магнитную связь между обмоткой – 1 и обмоткой – 1 – соответственно идеальный трансформатор – 2 с нагрузкой $X_{m21}(\omega)$. Для устранения взаимного влияния идеальных трансформаторов параллельно вторичной обмотке трансформатора – 1 включен контролируемый источник тока I_2 и наоборот, параллельно вторичной обмотке трансформатора – 2 – контролируемый источник тока I_1 . Алгоритм рекурсивных сверток для симулирования электрических цепей во времени представлен в [21].

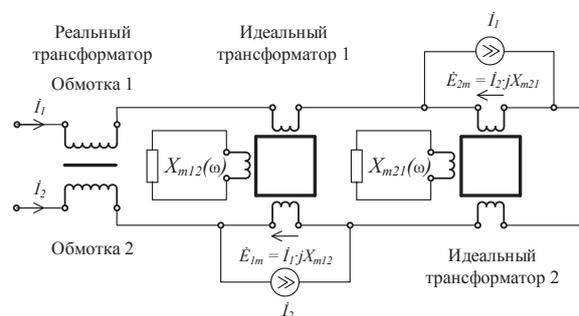


Рис. 2. Фрагмент модели реального трансформатора, отражающий наличие взаимной индуктивной связи между конкретными обмотками или их частями, при условии $X_{m12} \neq X_{m21}$

Fig. 2. Segment of the real transformer model. It reflects the occurrence of mutual inductive coupling between concrete windings or their parts at $X_{m12} \neq X_{m21}$

Учет нелинейности характеристик магнитопровода

Общим требованием при моделировании является необходимость учета нелинейных свойств магнитопровода трансформатора. Известные авторам методы рассчитаны на действие напряжения с заданной частотой. В нашем случае перенапряжения на обмотках никогда не появятся, если трансформатор отключен. Таким образом, необходимо считать с ситуацией, при которой на магнитную систему трансформатора влияют соизмеримые по величине напряжения разных частот.

При этом рабочей точкой на кривой намагничивания определяется величиной напряжения 50 Гц в момент возникновения перенапряжения. Если частота перенапряжений большая, например 5 кГц, а амплитуда перенапряжений равна амплитуде номинального напряжения 50 Гц, то изменение величины магнитной индукции в установившемся режиме работы должно составить 1 % от номинального значения индукции с частотой 50 Гц. Здесь также надо учесть инерцию в изменении магнитного потока в переходном режиме. Известно, что постоянная времени τ в магнитных цепях на несколько порядков больше τ для силовых электрических цепей. Если дополнительно учесть, что внутренние перенапряжения появляются в момент, близкий к максимуму значения напряжения 50 Гц (что соответствует нулевому значению магнитного потока), то напрашивается вывод, что экспериментальные частотные характеристики, снятые на напряжении до 1000 В, будут мало отличаться от характеристик при реальных воздействиях в эксплуатации.

По мере уменьшения частоты воздействующего перенапряжения степень его влияния на величину магнитного потока будет возрастать. Нам неизвестны технические решения в существующих моделях по учету влияния амплитуды и частоты воздействующего перенапряжения на величину магнитного потока в магнитопроводе. Как правило, в действующих моделях характер вебер-амперной характеристики задается частотой источника питания. Если дополнительно появляется источник возмущения с другой частотой, то адекватной реакции модели ожидать не приходится.

Диапазон частот, в пределах которого желательна корректировка вебер-амперной характеристики, соответствует диапазону частот, в пределах которого магнитопровод участвует в передаче энергии между обмотками трансформатора. Таким следует считать диапазон от 50 Гц до частоты, соответствующей точке пересечения характеристик холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

В общем случае, при заданной амплитуде воздействующего перенапряжения, амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе должна изменяться обратно пропорционально частоте воздействующего напряжения. Любое воздействие произвольной формы можно разложить в ряд Фурье, каждая составляющая которого подчиняется вышеописанному закону.

Определение закона изменения вынужденной составляющей магнитной индукции магнитопровода при воздействии на трансформатор, подключенный к сети 50 Гц, возмущающего импульса произвольной формы, предлагается производить в соответствии со схемой рис. 3. На рис. 3 $e(t)$ – зависимость импульса возмущения от времени; $E(50)$ – напряжение сети 50 Гц; R и X_c – параметры схемы, связанные между собой соотношением $\omega RC \gg 1$. Тогда на выходе схемы рис. 3 будет получено напряжение $u(t)$, эквивалентное изменению напряжения 50 Гц, по значению которого можно определить зависимость изменения индукции или потокосцепления $B(t)$. Ставя в соответствие значения $B(t)$ для заданного момента времени t_i значению необходимой для заданного магнитопровода магнитодвижущей силы (м.д.с.) можно получить требуемое значение суммы ампервитков всех обмоток трансформатора в данный момент времени.

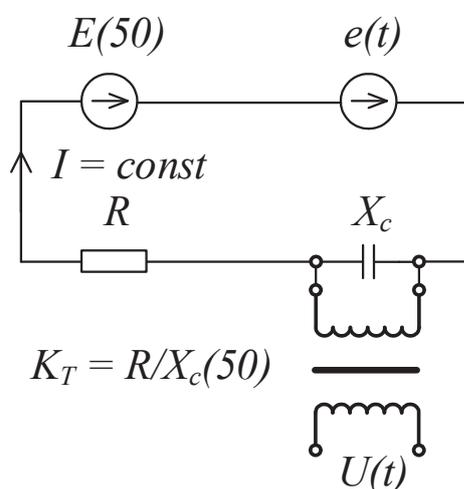


Рис. 3. Схема для определения закона изменения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора при действии на него возмущающего импульса перенапряжений $e(t)$

Fig. 3. Circuit for determining the law of variation of flux density in the transformer core under overstress pulse disturbance $e(t)$

Учет неравномерности распределения полей рассеяния

С использованием метода [20] проведены экспериментальные исследования и определены частотные характеристики активных и реактивных составляющих сопротивлений моделей регулировочной и основной части обмотки ВН, а также обмотки НН трансформатора, разработан метод их реализации.

Было проведено две независимые серии опытов по определению значений составляющих расчетных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН, а также регулировочной и основной части обмотки ВН (при наличии взаимоиндуктивности между соответственно основной частью обмотки ВН и обмоткой НН, а также между основной и регулировочной частями обмотки ВН). Метод позволяет по данным эксперимента непосредственно

определить зависимость активной мощности, получаемой от источника питания, и зависимость реактивной мощности, генерируемой конденсатором для компенсации потерь реактивной мощности в трансформаторе, от частоты.

На рис. 4 приведены результаты измерения распределения напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенным со стороны обмотки НН. Методика измерений приведена в [18]. Объединяет все кривые рис. 4 один общий фактор: по обмотке ВН трансформатора протекает ток, фаза которого совпадает с фазой, приложенной к трансформатору ЭДС. Как видно из рис. 4, распределение напряжения вдоль обмотки неравномерное. Степень неравномерности и ее характер зависят от частоты напряжения питания. В общем случае напряжение на участке обмотки – это векторная сумма ЭДС $\Delta \dot{E}_i$ участка обмотки, наводимой основным магнитным потоком, и падения напряжения $\Delta \dot{U}_i$ на сопротивлении рассеивания участка от протекания по нему активной составляющей тока. От соотношения этих составляющих зависит и характер распределения. Если $\Delta \dot{U}_i \ll \Delta \dot{E}_i$, то распределение равномерное, и наоборот.

Как видно из рис. 4, наиболее опасным с точки зрения увеличения градиентов напряжения на отдельных участках обмотки ВН данного трансформатора диапазоном частот является диапазон 4–69 кГц, который совпадает с диапазоном максимальных значений $R_{(ВН+НН)}$, рис. 5. При более высоких частотах распределение напряжения приближается к равномерному.

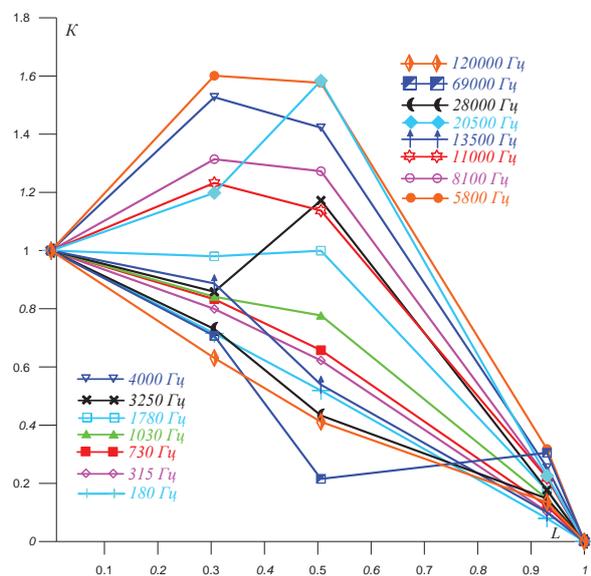


Рис. 4. Распределение напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенными со стороны обмотки НН

Fig. 4. Stress distribution along the main part of high voltage (HV) winding for resonant frequencies between a transformer and a condenser connected from low voltage (LV) winding

Рис. 4 – наглядный неопровержимый экспериментальный факт, подтверждающий выдвинутое в [20] положение о необходимости кардинального пересмотра теории полей рассеяния трансформатора, т. к. существующая теория не в состоянии объяснить факт неравномерного распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора. Важно также, что во всем диапазоне частот сопротивление трансформатора в целом носит активно-индуктивный характер. На рис. 5 представлены зависимости активных и реактивных составляющих суммарных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания от частоты напряжения источника питания.

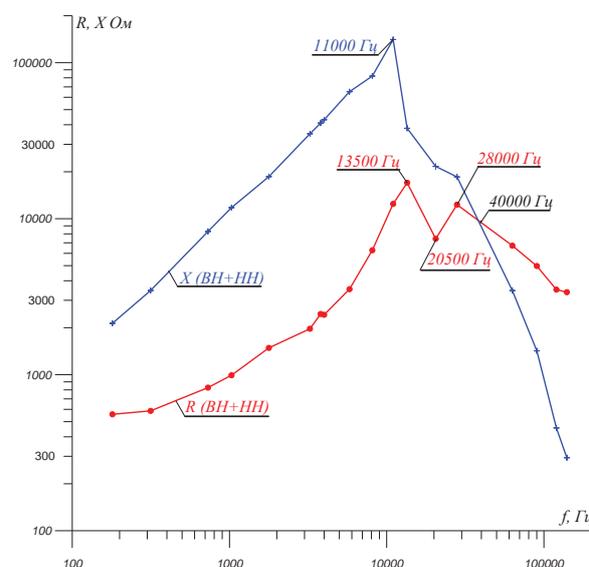


Рис. 5. Зависимости активной и реактивной составляющих суммарных сопротивлений обмоток ВН и НН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания от частоты напряжения источника питания

Fig. 5. Dependence of active and reactive components of overall resistances of HV and LV windings of the transformer reduced to the power supply voltage on voltage frequency of the power supply voltage

Насколько нам известно, представленная на рис. 5 зависимость $R_2(f)$ – первая попытка экспериментального определения характера изменения активного сопротивления обмоток трансформатора от частоты. Как видно из рис. 5, зависимость $R_2(f)$ обмоток ВН и НН монотонно увеличивается до частоты 13,5 кГц, что не противоречит общепринятым представлениям. Начиная с частоты 13,5 до 20,5 кГц имеет место резкое снижение значения сопротивления. В этом диапазоне частот в обмотке ВН трансформатора происходит основная масса резонансных явлений, которые кардинально меняют характер протекания тока внутри обмотки. Аналогичный процесс возникает и вблизи частоты 28–30 кГц, но с относительно меньшими амплитудами перенапряжений.

В [1. С. 42–43] констатируется: «Потери играют важную роль в точной имитации распределе-

ния напряжений...» и приводятся формулы (4.12), (4.13), с помощью которых следует учесть влияние частоты на величину активных сопротивлений, которые должны увеличиваться пропорционально $\sqrt{\omega}$. Результаты экспериментальных исследований рис. 5 доказывают несостоятельность рекомендаций [1]. Одно дело – потери в проводе, развернутом в длину, другое дело, когда из этого провода сделана обмотка!

Проведенные опыты показали, что потери реактивной мощности в магнитопроводе трансформатора для резонансных режимов не превышают 0,1–0,5 % мощности, генерируемой конденсатором, и этими потерями можно пренебречь. Тогда вся реактивная мощность, генерируемая конденсатором, должна расходоваться на потери в реактивных сопротивлениях обмоток. Как видно из рис. 5, зависимости $X_s(f)$ качественно похожи на зависимости $R_s(f)$. Принципиально новое явление на наш взгляд здесь есть характер изменения суммарной индуктивности рассеяния после частоты 11 кГц (рис. 5). Уменьшение значения индуктивности рассеяния после частоты 11 кГц обусловлено возникновением резонансных процессов между напряжениями взаимной индукции частей обмотки ВН. При частотах 40–120 кГц суммарное сопротивление трансформатора имеет практически активный характер.

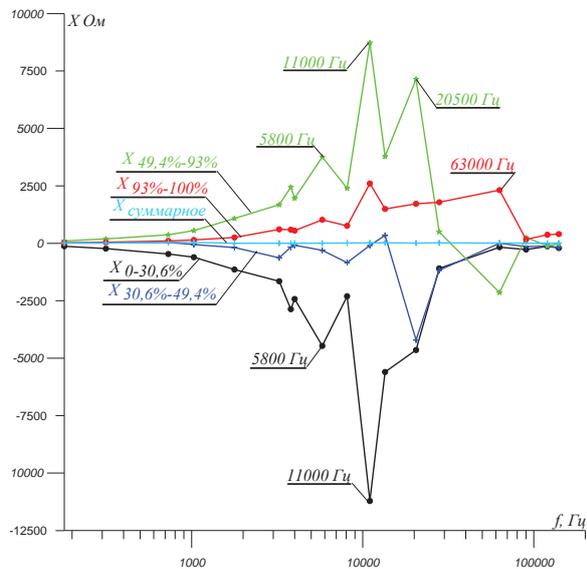


Рис. 6. Зависимости реактивных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН от частоты источника питания

Fig. 6. Dependence of reactive components of the model resistance on the sections of the main part of HV winding on the power supply source frequency

До сих пор мы рассматривали изменение суммарных потоков рассеяния. Для целей нашего исследования важно изучить распределение суммарного потока рассеяния между обмотками ВН и НН, а также между частями обмотки ВН. На рис. 6 представлена измеренная по методу [20] зависимость величины реактивных составляющих сопро-

тивлений участков модели основной части обмотки ВН от частоты источника питания. Как видно из рис. 6, обмотка ВН имеет две примерно равные части, с противоположными по знаку значениями реактивных сопротивлений, которые для всей обмотки взаимно компенсируются. Таким образом, можно утверждать, что представленная на рис. 5 зависимость составляющей суммы реактивных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН является расчетным индуктивным сопротивлением только обмотки НН.

На рис. 7 приведены зависимости активных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН и обмотки НН от частоты источника питания. Как видно из рис. 6 и 7, основные потери активной мощности трансформатора приходятся на обмотку ВН, а реактивной – на обмотку НН. Обмотка НН также в некоторой степени участвует в уравнительном обмене активной мощности между обмотками, и при частотах 1000–10000 Гц имеет место ее потребление в обмотке НН.

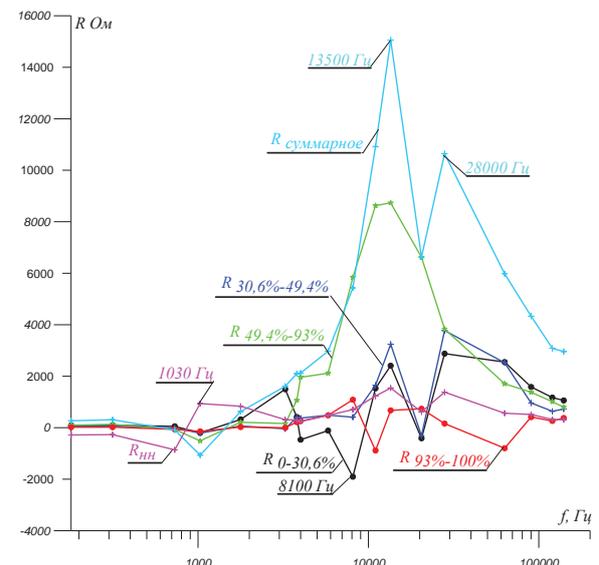


Рис. 7. Зависимости активных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН и обмотки НН (приведенных к обмотке ВН) от частоты источника питания

Fig. 7. Dependence of active components of the model resistance on the sections of the main part of HV and LV windings (reduced to HV winding) on the power supply source frequency

Принципиально важным результатом изложенного выше этапа исследований является характер изменения реактивной составляющей моделей расчетных сопротивлений обмоток. Как следует из рис. 5, 6, имеются широкие диапазоны частот, в пределах которых индуктивное сопротивление с ростом частоты должно уменьшаться по модулю, оставаясь индуктивным по характеру. И наоборот – емкостное сопротивление с ростом частоты должно увеличиваться. Реализация таких частотных характеристик в виде системы двухполюс-

сников известными ТОЭ методами невозможна. Этого, к сожалению, не понимают авторы [1]. На рис. 4.5а [1. С. 37] приведена частотная характеристика обмотки НН трансформатора, а на рис. 4.5в – ее фазовые углы. Из рис. 4.5 следует, что на возрастающих участках сопротивление имеет активно-индуктивный характер, на участках, где сопротивление с ростом частоты уменьшается, – активно-емкостной. А в [1. С. 38, 39] излагается методика моделирования характеристики, чтобы модель обмотки соответствовала оригиналу.

Приведенные на рис. 5, 6 зависимости реактивных сопротивлений представляют собой так называемые расчетные значения для случаев одновременного протекания токов соответственно в обмотках ВН и НН.

Изменение состава обмоток или их частей, по которым в данном режиме протекают токи нагрузки, приводит к изменению расчетных сопротивлений рассеяния. Например, трансформатор работает в режиме холостого хода и подвергается воздействию перенапряжений. По условиям рабочего режима регулировочная часть обмотки ВН не задействована. Как следует из [19], наибольшие кратности перенапряжений развиваются на регулировочной части обмотки ВН, в результате на ее выводах произойдет короткое замыкание. При этом до отключения трансформатора из сети распределение на основной части обмотки ВН будет отличаться от представленного на рис. 4.

В соответствии с рекомендациями [20] были проведены опыты для определения суммарных активной и реактивной составляющих сопротивлений моделей частей обмотки ВН для вышерассмотренного режима, в зависимости от частоты источника питания. Распределение напряжений вдоль основной части обмотки ВН показано на рис. 8, а зависимости суммарных составляющих сопротивления – на рис. 9. Сравнение данных рис. 4 и 8 показывает, что распределение напряжений вдоль основной части обмотки ВН, в зависимости от частоты, изменилось существенно, хотя максимальные кратности перенапряжений остались на прежнем уровне. Здесь уместно обратить внимание на ранее неизвестный факт о том, что при резонансе трансформатора с *линейными* параметрами с внешней емкостью сети распределение напряжения вдоль обмотки ВН *нелинейно!* Таким образом основным фактором, который влияет на аварийность трансформатора, является не кратность перенапряжения вообще (которую все стремятся определить), а *кратность перенапряжений на наиболее опасном участке обмотки*, которая может быть в несколько раз больше. Именно это обстоятельство требует, в числе прочих, моделировать не всю обмотку, а разбивать ее на части.

Представленные на рис. 9 зависимости качественно не противоречат зависимостям рис. 5. Существенное увеличение модулей сопротивлений обусловлено разными номинальными мощностями

обмотки НН (100 %) и регулировочной части обмотки ВН (8 %).

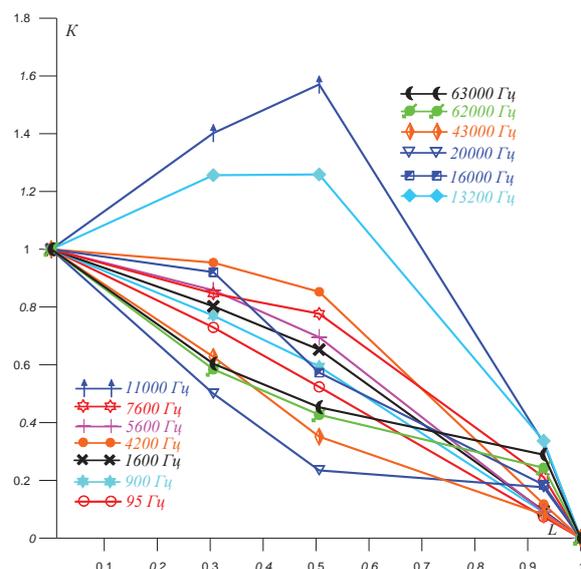


Рис. 8. Распределение напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенным к регулировочной части обмотки ВН

Fig. 8. Stress distribution along the main part of the HV winding for resonant frequencies between a transformer and a condenser connected to the adjusted part of the LV winding

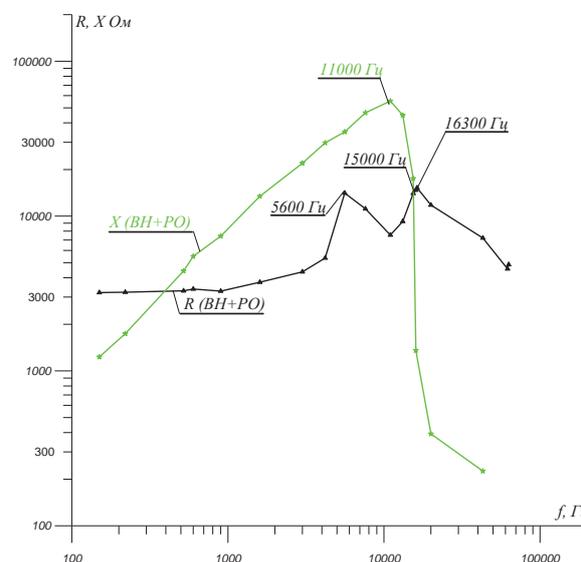


Рис. 9. Зависимости активных и реактивных составляющих суммарных сопротивлений основной и регулировочной частей обмотки ВН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания, от частоты напряжения источника питания

Fig. 9. Dependence of active and reactive components of the overall resistances of the main and adjusted parts of the transformer HV winding, reduced to the power supply source resistance on model resistance, on the power supply source frequency

Моделирование функций частотных характеристик составляющих комплексных сопротивлений

Эффективный метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений предложен в [20]. Этой проблеме в [1, 2] уделяется мало внимания. Просто утверждается, что имея матрицу проводимостей $Y(\omega)$, можно синтезировать модель. В целом, соглашаясь с этим утверждением, отметим, что оно не всегда правильное. В частности реализация частотной характеристики активных сопротивлений, определяемой по уравнениям (4.12, 4.13) в [1], ранее была принципиально невозможной.

С учетом вышесказанного проиллюстрируем эффективность предложенного в [20] метода на примере реализации суммарного активного сопротивления основной части обмотки ВН (рис. 7). Схема модели представлена на рис. 10. Параметры модели этого сопротивления приведены в таблице, а полученная и исходная характеристики представлены на рис. 11.

Таблица. Значения параметров модели
Table. Values of the model parameters

| № ячейки / Cell | L_i , Гн (H) | R_i , Ом (Ohm) | C_i , Ф (F) |
|-----------------|----------------|------------------|---------------|
| 1 | 5,00E-02 | 5725,00 | 2,78E-09 |
| 2 | 4,00E-02 | 4650,00 | 7,04E-10 |
| 3 | 8,00E-03 | -3150,00 | 7,53E-09 |
| 4 | 5,00E-03 | 800,00 | 3,52E-10 |
| 5 | 5,00E-04 | -325,00 | 2,45E-08 |
| 6 | 5,00E-02 | 581,00 | 4,80E-08 |
| 7 | 7,50E-02 | -805,00 | 2,79E-07 |
| 8 | 1,00E-01 | 150,00 | 2,55E-06 |
| 9 | 7,60E-03 | 100,50 | 6,25E-06 |
| 10 | 3,05E-03 | 77,50 | 2,62E-06 |
| 11 | 5,00E-05 | -82,50 | 8,01E-05 |
| 12 | 2,00E-03 | -137,50 | 1,05E-07 |
| 13 | 1,75E-03 | -3000,00 | 1,06E-07 |
| 14 | 5,00E-04 | -550,00 | 1,75E-07 |
| 15 | 5,00E-05 | -300,00 | 8,61E-07 |
| 16 | 5,00E-08 | 124,50 | 2,58E-05 |

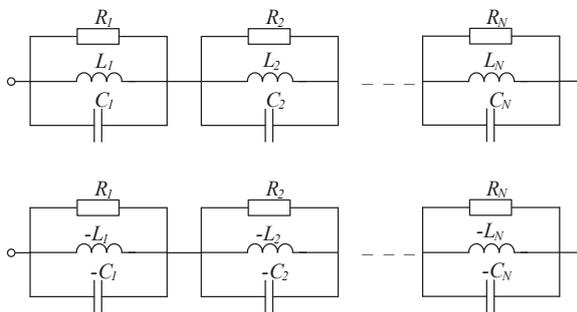


Рис. 10. Модель двухполюсников, реализующих зависимость от частоты активной составляющей комплексного сопротивления обмотки ВН

Fig. 10. Model of two-pole networks implementing the dependence on the active component frequency of the complex resistance in HV winding

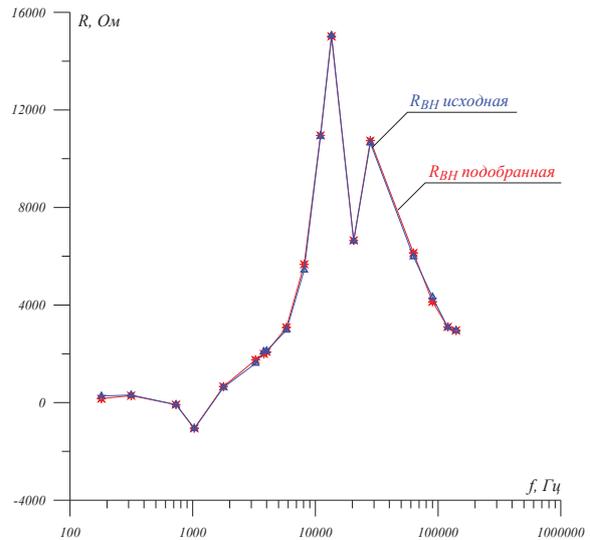


Рис. 11. Сравнение частотных характеристик оригинала и модели активного сопротивления основной части обмотки ВН $R_{ВН}$

Fig. 11. Comparison of frequency characteristics of the original active resistance in the main part of the HV winding $R_{ВН}$ and its model

Среднеквадратичная погрешность моделирования не превысила 3,3 %, что достаточно для практических целей.

Выводы

1. При резонансе трансформатора с линейными параметрами с емкостью, в том числе сети, в которую трансформатор передает энергию, распределение напряжения вдоль обмотки и между обмотками *нелинейно*. Задача моделирования – определить кратности перенапряжения на наиболее опасном участке обмотки.
2. Под действием стороннего магнитного потока в отключенных обмотках и их частях развиваются резонансные процессы с частотой, зависящей от параметров обмоток или их частей, что при моделировании должно быть учтено организацией соответствующих взаимных связей по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода.
3. Разработан метод моделирования взаимных связей между обмотками и их частями, который учитывает нарушение принципа взаимности взаимной индукции в реальных трансформаторах.
4. Разработан метод учета нелинейности магнитопровода, при действии на трансформатор перенапряжений сети.
5. Разработан метод экспериментального определения составляющих комплексного сопротивления обмоток и их частей для заданного режима работы и метод реализации частотных характеристик составляющих комплексного сопротивления при моделировании.

6. Параметры сети, питающей трансформатор, определяют формы и величины воздействующих на трансформатор перенапряжений, которые для конкретного трансформатора в основном стабильны, а параметры сети, в которую трансформатор передает электроэнергию, вместе с параметрами трансформатора – резонансные частоты, на которых возможно появление на элементах трансформатора опасных перенапряжений. Эти резонансные частоты будут меняться с изменением нагрузки трансформатора в широком диапазоне.
7. Стандартные программные комплексы, в том числе и коммерческие, с помощью которых реализуются разработанные модели, в том числе и такие, которые учитывают геометрию трансформатора, не приспособлены для реализации подходов, изложенных в настоящих выводах. Предстоит долгая работа по их адаптации.
8. Проблема повышения надежности трансформаторов при возникновении резонансных процессов – это проблема не CIGRE, а ИЕС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 175 p.
2. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 123 p.
3. IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer, Switching Device, and System Interaction. – NY: IEEE, 2010 – P. 57–142.
4. Term of Reference, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, Cigre A2/C4 committee. JWG A2/C4.39. – Paris: CIGRE, 2014. – 2 p.
5. Study Committee 12 (Transformers) – WG 12-07, Resonance Behavior of High-Voltage Transformers / A. Schei, K. Alstad, J.B. Sund, M. Rian, E. Nordrik, J. Hopperstad // Proc. 1984 CIGRE? Large High Voltage Electric Systems Int. Conf. – Paris: CIGRE, 1984. – P. 1–8.
6. Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations, CIGRE Working Group 33-13_1988. – Paris: CIGRE, 1988. – 20 p.
7. Electrical environment of transformers – Impact of fast transients, CIGRE Joint Working Group A2-A3-B3.21 / M. Glinkowski, W. Buesch, J. Lopez-Roldan, J. Poittevin, M. Saravolac, W. Seitlinger, N.-C. Wang // *Electra*. – Feb. 2005. – № 218. – P. 24–38.
8. Sybille G., Gavrilovic M.M., B?langer J. Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – March 1985. – V. PAS-104. – № 3. – P. 671–680.
9. Temporary over-voltages withstand characteristics of extra high voltage equipment, CIGRE WG 33.10 / Clerici A., Ardito A., Eitzmann M., Rioual M., Shperling B., Sybille G., Van Der Merwe C., Volker O., Wahlstrom B., Zaima E. // *Electra*. – August 1998. – № 179. – P. 38–49.
10. Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests / M. Rioual, P. Guunic, D. Laval, M. Adelghani, N. Schaefer, M. Sch?fer // Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them: IEEE General Meeting. – Pittsburgh, 20–24 July 2008. – P. 1–8.
11. Stresses in metal-oxide surge-arresters due to temporary harmonic overvoltages / N. Nenemenlis, M. En?, J. B?langer, G. Sybille, L. Snider // *Electra*. – 1990. – № 130. – P. 79–115.
12. Ljung L. System Identification. Theory for the user. 2nd ed. – USA, New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 672 p.
13. Van den Bosh P.P.J., Van der Klauw A.C. Modeling, Identification and Simulation of Dynamic Systems. – USA, Florida: CRC Press, 1994. – 208 p.
14. Nelles O. Nonlinear System Identification. – Germany, Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
15. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / И.Р. Бучковский, М.М. Молнар, А.Л. Никонец, Л.А. Никонец, М.Б. Сабат / под ред. Л.А. Никонца. – Львов: НВФ «Українські технології», 2012. – 167 с.
16. Электромагнитные процессы и условия возникновения резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора / М.Б. Сабат, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 91–102.
17. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН / Л.А. Никонец, М.Б. Сабат, И.Р. Бучковский, Р.В. Бучковский, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // *Электрические станции*. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
18. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии на него перенапряжений / Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. // *Электрические станции*. – 2014. – № 12. – С. 18–26.
19. Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Методы исследования электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений со стороны сети // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 86–98.
20. Blakiewicz G., Janke W. Recursive convolution algorithms for time-domain simulation of electronic circuits // *CMST*. – 2001. – № 7 (2). – P. 91–109.

Поступила 24.11.2014 г.

UDC 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WINDINGS UNDER THE INFLUENCE OF NETWORK OVERVOLTAGE

Leonid A. Nykonets,

Dr. Sc., National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

Aleksey L. Nykonets,

National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

Vladimir P. Venger,

National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city, 79013, Ukraine. E-mail: vol.venher@gmail.com

The relevance of the study. The phenomenon of internal resonance was not taken into consideration by any executive directive in the World when reasoning the necessary level of longitudinal insulation. Studying the phenomenon and stating recommendations will help to increase the working reliability of transformers.

The main aim of the study is to state the basics of modeling, which guarantee the adequacy of simulating electromagnetic processes in transformer windings, under the influence of network overvoltage.

The methods used in the study: frequency methods of natural experiment and electrical circuit analysis.

The results. The main requirements to the models are stated: 1. A design model has to include elements, which simulate magnetic core, insulation, windings, windings' parts and their interaction with the main magnetic flux. 2. A design model has to reflect electromagnetic processes in a transformer, influenced by voltages of free form and frequency. 3. As the components of the common magnetic flux (magnetic flux inside a magnetic core and magnetic flux outside a magnetic core) influence the parameters of electromagnetic processes in a transformer in a different way, these components have to be modelled separately.

Conclusions. Voltage distribution along a winding and between windings is nonlinear during resonance between a transformer with linear parameters and capacitance of the network (including), where the transformer transfers energy. The task of simulation is to define overvoltage ration on the most dangerous section of a winding. The influence of magnetic flux results in developing of resonance processes of a frequency depended on parameters of windings and their parts, in disabled windings. This issue should be taken into account during modeling by creating corresponding mutual inductance connections on the magnetic flux return path, outside a magnetic core. The authors developed the method of simulating mutual inductance connections between windings and their parts. The method takes into account the violation of reciprocity principle of mutual inductance in real transformers. The authors developed the method of accounting magnetic core nonlinearity, when a transformer is influenced by network overvoltage, and the method of experimental definition of components of complex impedance of windings and their parts for a given mode of operation, and the method of realization of frequency characteristics of complex impedance components. Standard software packages, which implements the developed models, including the ones, which take into account the geometry of a transformer, are not adapted for implementing the approaches, given here. The problem of increasing transformer reliability in cases of resonance occurrence is not the problem of CIGRE, but IEC.

Key words:

Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, frequency research method, model.

REFERENCES

1. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 175 p.
2. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 123 p.
3. *IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer, Switching Device, and System Interaction.* NY, IEEE, 2010. pp. 57–142.
4. *Term of Reference, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, Cigre A2/C4 committee. JWG A2/C4.39.* Paris, CIGRE, 2014. 2 p.
5. Schei A., Alstad K., Sund J.B., Rian M., Nordrik E., Hopperstad J. Study Committee 12 (Transformers) – WG 12–07, Resonance Behavior of High-Voltage Transformers. *Proc. 1984 CIGRE Large High Voltage Electric Systems Int. Conf.* Paris, CIGRE, 1984. pp. 1–8.
6. *Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations, CIGRE Working Group 33–13_1988.* Paris, CIGRE, 1988. 20 p.
7. Glinkowski M., Buesch W., Lopez-Roldan J., Poittevin J., Saravolac M., Seitlinger W., Wang N.-C. Electrical environment of transformers – Impact of fast transients, CIGRE Joint Working Group A2-A3-B3.21 // *Electra.* – Feb. 2005. – № 218. – P. 24–38.
8. Sybille G., Gavrilovic M.M., B?langer J. Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, March 1985, vol. PAS-104, no. 3, pp. 671–680.
9. Clerici A., Ardito A., Eitzmann M., Rioual M., Shperling B., Sybille G., Van Der Merwe C., Volker O., Wahlstrom B., Zaima E. Temporary over-voltages withstand characteristics of extra high voltage equipment, CIGRE WG 33.10 // *Electra*, August 1998, no. 179, pp. 38–49.
10. Rioual M., Guuinic P., Laval D., Adelghani M., Schaefer N., Sch?fer M. Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests. *Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them: IEEE General Meeting*, 20–24 July 2008. pp. 1–8.
11. Nenemenlis N., En? M., B?langer J., Sybille G., Snider L. Stresses in metal-oxide surge-arresters due to temporary harmonic overvoltages. *Electra*, 1990, no. 130, pp. 79–115.

12. Ljung L. *System Identification. Theory for the user*. 2nd ed. USA, New Jersey, Prentice Hall, 1999. 672 p.
13. Van den Bosh P.P.J., Van der Klauw A.C. *Modeling, Identification and Simulation of Dynamic Systems*. USA, Florida, CRC Press, 1994. 208 p.
14. Nelles O. *Nonlinear System Identification*. Germany, Berlin, Springer, 2001. 785 p.
15. Buchkovsky I., Molnar M., Nykonets A., Nykonets L., Sabat M. *Fizicheskie yavleniya vnutrennego rezonansa v elektrooborudovaniy s obmotkami vysokogo napryazheniya* [Physical phenomenon of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings]. Ed. by Nykonets L. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
16. Sabat M., Nykonets A., Venger V., Venger V. Elektromagnitnye protsessy i usloviya vozniknoveniya rezonansnykh perenapryazheniy v obmotkakh transformatora [Electromagnetic processes and conditions of appearance of resonance overvoltage in transformer windings]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 91–102
17. Nykonets L., Sabat M., Buchkovsky I., Buchkovsky R., Nykonets A., Venger V., Venger V. Raspredeleniye vozdeystviy ushchikh na transformator napryazheniy vdol obmotki VN [Voltage distribution influencing a transformer along high voltage winding]. *Electricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 51–56.
18. Nykonets A., Venger V., Venger V. Elektromagnitnye protsessy v obmotkakh transformatora pri deystvii na nego perenapryazheniy [Electromagnetic processes in transformer windings influenced by overvoltage]. *Electricheskie stantsii*, 2014, no. 12, pp. 18–26.
19. Venger V., Venger V., Nykonets A. Metody issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v obmotkakh transformatorov pri deystvii na nikh perenapryazheniy so storony seti [Research methods of electromagnetic processes in transformer windings influenced by power system overvoltage]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 3, pp. 86–98.
20. Blakiewicz G., Janke W. Recursive convolution algorithms for time-domain simulation of electronic circuits. *CMST*, 2001, no. 7 (2), pp. 91–109.

Received: 24 November 2014.

УДК621.314

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЛАГОПРИЯТНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ ИНВЕРТОРА ТОКА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ СО ЗВЕНОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Осипов Александр Владимирович,

канд. техн. наук, зав. лаб. НИИ автоматики и электромеханики
при Томском университете систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ossan@mail.ru

Шиняков Юрий Александрович,

д-р техн. наук, директор НИИ космических технологий
Томского университета систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: shua@main.tusur.ru

Отто Артур Исаакович,

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета систем
управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
E-mail: ottoai@mail.ru

Черная Мария Михайловна,

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета систем
управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
E-mail: cmm91@inbox.ru

Ткаченко Александр Александрович,

канд. техн. наук, зав. отделом НИИ автоматики и электромеханики
при Томском университете систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: aem@tusur.ru

Актуальность работы определяется необходимостью уменьшения динамических потерь в транзисторах преобразователя со звеном повышенной частоты на основе регулируемого инвертора тока.

Цель работы: анализ коммутационных процессов в регулируемом инверторе тока, разработка схемы и способа регулирования выходного тока, обеспечивающих безопасную траекторию переключения силовых транзисторов.

Методы исследования основаны на общих положениях теории электрических цепей, теории алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем и методов математического моделирования.

Результаты. Рассмотрены коммутационные процессы при резонансном переключении транзисторов инвертора тока в преобразователе со звеном повышенной частоты. Показано, что блокирующие диоды инвертора ограничивают амплитуду резонансных колебаний тока транзисторов на уровне тока входного дросселя. Исключение блокирующих диодов и включение обратных диодов транзисторов приводит к возможности реверса тока коммутирующего дросселя и существенному завышению тока транзисторов, определяемому в этом случае балансом мощности реактивных элементов коммутационного контура. Исследованы коммутационные процессы транзисторов инвертора при фазовом регулировании выходного тока, при этом установлено, что на интервале закорачивания входного источника ток транзистора состоит из составляющей тока самого источника питания и составляющей тока, накопленного в коммутирующих дросселях при разряде конденсатора включаемого транзистора. Показано, что максимальный ток транзисторов определяется соотношением волнового сопротивления коммутирующего контура и сопротивления нагрузки. Составлены уравнения энергобаланса, на основе которых получены соотношения, позволяющие определить максимальные значения электрических параметров транзисторов. Сделаны выводы, проведено обсуждение полученных результатов.

Ключевые слова:

Инвертор тока, коммутационные процессы, динамические потери, коммутирующий резонансный контур, безопасное переключение транзисторов.

Введение

Преобразователи постоянного напряжения, обеспечивающие произвольное согласование уровней входного и выходного напряжений за счет введения в структуру трансформатора, широко известны [1, 2] и находят применение во многих направлениях электроники, в том числе в солнечной энергетике [3, 4]. В частности, в нашей стране про-

изводятся попытки применения таких преобразователей в системах электропитания космических аппаратов [5–8], вместо широко используемых систем электропитания на базе бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения [9, 10]. При этом, ввиду того, что солнечная батарея на разных участках вольт-амперной характеристики (ВАХ) может иметь свойства как источни-

ка напряжения, так и источника тока, могут применяться соответственно как инверторы напряжения [7], так и инверторы тока [8].

Сопоставление энергетических характеристик указанных вариантов реализации преобразователя в реальных диапазонах изменения ВАХ солнечной батареи показало эффективность именно систем на основе инверторе тока. Однако при построении системы на основе «классического» инвертора тока в его ключах присутствуют блокирующие обратную проводимость диоды, существенно увеличивающие статические потери и ухудшающие КПД преобразователя, что крайне нежелательно при построении систем электропитания космических аппаратов. Поэтому функцию блокирующих диодов в преобразователях с выходом на постоянном токе выполняют диоды выходного выпрямителя [8].

Другим важным направлением минимизации потерь в преобразователе является уменьшение коммутационных потерь при переключении транзисторов, обеспечиваемое путем их безопасного переключения, включения при нуле напряжения (ZVS) и выключения при нуле тока (ZCS), реализация непосредственного преобразователя повышающего типа с «мягкой» коммутацией рассмотрена в [11, 12]. В преобразователях со звеном повышенной частоты на инверторе напряжения для обеспечения безопасного выключения транзисторов традиционно применяется параллельное включение конденсаторов, демпфирующих процесс выключения транзисторов. При этом на интервале коммутационной паузы эти конденсаторы вступают в резонанс с индуктивностью рассеяния трансформатора, формируемые при этом гармонические колебания напряжения на закрытом транзисторе в определенные моменты времени обеспечивают условия для ZVS [13]. Другой способ состоит в формировании колебаний в дополнительном контуре [14]. Коммутационные процессы в инверторе тока для резонансных схем с выходом на переменном токе исследованы в [15–17], для преобразователей с выходом на постоянном токе и промежуточным звеном высокой частоты «мягкое» переключение формируется с помощью резонансных контуров [18–20]. При этом значения параметров реактивных элементов резонансного контура меняются по гармоническому закону и формируют благоприятные условия для переключения лишь в определенные моменты времени, что затрудняет реализацию плавного регулирования выходного тока. Например, в [19, 20] эта задача решается введением дополнительного транзистора, подключающего в требуемые моменты времени на вход инвертора конденсатор-кламп и обрывающего колебательный процесс. Таким образом, исследование коммутационных процессов в инверторе тока при его работе на выпрямитель и разработка способов безопасного переключения транзисторов в этих схемах является целью настоящей работы.

Нерегулируемая схема инвертора тока

На коммутационные процессы в инверторе тока оказывает большое влияние специфика его работы, в частности, в отличие от инвертора напряжения, в инверторе тока коммутационная пауза формируется путем одновременного включения всех транзисторов инвертора, что позволяет заколотить входной источник. Для минимизации потерь при включении последовательно с транзисторами вводятся коммутирующие дроссели L_1-L_4 , затягивающие фронт тока на включаемом транзисторе, и конденсатор C_p , обеспечивающий формирование резонансных колебаний на интервале коммутационной паузы (рис. 1, а).

Принцип работы схемы поясняется диаграммами токов и напряжений транзисторов инвертора тока с коммутирующими дросселями $L_1=L_2=L_3=L_4=1$ мкГн и резонансным конденсатором $C_p=0,1$ мкФ, которые при разных значениях паузы t_{pause} показаны на рис. 1, б, в. При включенной диагонали VT2, VT3 и включении транзисторов VT1, VT4 за счет дросселей происходит плавное увеличение тока в открываемых транзисторах VT1, VT4 и уменьшение в VT2, VT3, что приводит к уменьшению выходного тока инвертора. Смена полярности последнего и, соответственно, дальнейшее изменение токов транзисторов происходит за счет разряда резонансного конденсатора, ток которого не может превышать тока входного дросселя, т. к. через него проходит цепь разряда. Далее процессы определяются балансом мощности реактивных элементов. В случае, представленном на диаграммах, энергия заряженного конденсатора превышает энергию дросселей, поэтому к моменту равенства тока конденсатора и тока входного дросселя на конденсаторе остается напряжение, которое запирает диоды транзисторов VT1, VT4 и разряжается током входного дросселя через транзисторы VT2, VT3. Вышесказанное можно отразить уравнением

$$\frac{C_p \cdot U_{\text{вых}}^2}{2} = \frac{L \cdot I_L^2}{2} + \Delta E_{C_{\text{discharge}}},$$

где I_L – ток входного дросселя; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение, приведенное к первичной обмотке трансформатора; $\Delta E_{C_{\text{discharge}}}$ – энергия конденсатора, сброшенная в дроссель.

Следует отметить, что интервал сброса энергии в дроссель является наиболее благоприятным для выключения транзисторов VT1, VT4, так как их ток равен нулю (рис. 1, б). Однако при включенных транзисторах колебательный процесс продолжается с амплитудой напряжения на конденсаторе U_k , соответствующей равенству энергии конденсатора и коммутирующих дросселей, токи транзисторов при этом колеблются с полной амплитудой тока входного дросселя

$$\frac{C_p \cdot U_k^2}{2} = \frac{L \cdot I_L^2}{2}, \quad U_k = I_L \sqrt{\frac{L}{C_p}}.$$

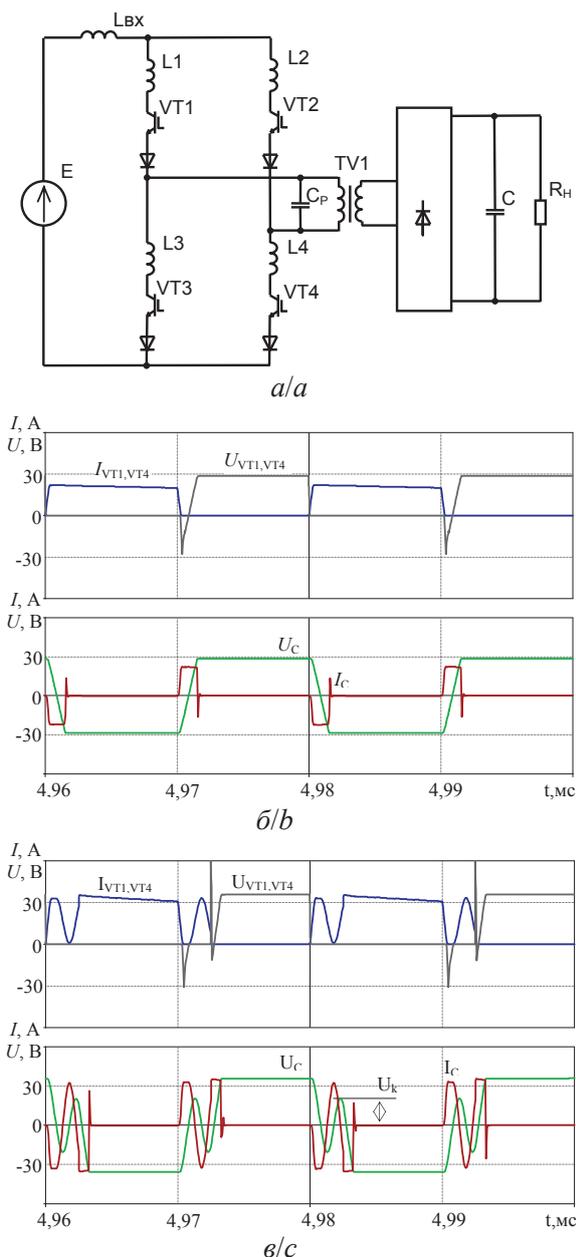


Рис. 1. Инвертор тока с блокирующими диодами и диаграммы его работы: а) схема инвертора тока с коммутирующими дросселями; б) благоприятное выключение, пауза $t_{\text{pause}}=0,6$ мкс; в) неблагоприятное выключение, пауза $t_{\text{pause}}=2,5$ мкс

Fig. 1. Current inverter with blocking diodes and diagrams of its operation: а) current inverter with switching chokes; б) favorable switching off, pause $t_{\text{pause}}=0,6$ ms; в) unfavorable switching off, pause $t_{\text{pause}}=2,5$ ms

В данном случае коммутационные потери зависят от момента выключения. Так, например, выключение при существенном токе (рис. 1, в) нежелательно.

Таким образом, в инверторе тока можно реализовать полностью благоприятное переключение транзисторов. Однако статические потери в такой схеме существенны в первую очередь из-за наличия блокирующих диодов, установка которых в клас-

сических схемах необходима для исключения закорачивания напряжения выходного конденсатора. В случае работы инвертора на выпрямитель блокирующие диоды могут быть исключены из схемы, так как закорачиванию выходного конденсатора препятствуют диоды выпрямителя. Схема инвертора тока без блокирующих диодов представлена на рис. 2, а, при отсутствии блокирующих диодов у транзисторов появляется обратная проводимость за счет работы обратных диодов, поэтому коммутационные процессы в инверторе тока существенно меняются, диаграммы представлены на рис. 2, б, в.

Как и в случае схемы на рис. 1, при включении транзисторов VT1, VT4 происходит плавное перераспределение токов между парами транзисторов VT2, VT3 и VT1, VT4, однако за счет обратных диодов разряд резонансного конденсатора происходит полностью до снижения его напряжения до нуля, в результате чего ток коммутирующих дросселей, а соответственно, и транзисторов может существенно превышать ток входного дросселя. Таким образом, амплитуда колебаний напряжения резонансного конденсатора равна амплитуде выходного напряжения, при этом ток колебательного контура из-за работы обратных диодов определяется соотношением энергий, запасенных в индуктивностях, по отношению к энергии резонансного конденсатора

$$\frac{C_p \cdot U_{\text{вых}}^2}{2} = \frac{L \cdot I_k^2}{2}, \quad I_k = U_{\text{вых}} \sqrt{\frac{C_p}{L}}$$

Интервал, на котором ток коммутирующих дросселей превышает ток входного дросселя, является наиболее благоприятным для выключения транзисторов VT1, VT4, так как их обратные диоды в это время открыты, случай на рис. 2, б. Однако, если транзисторы не запирать, колебательный процесс продолжается с амплитудой тока в дросселях, превышающей входной ток соответственно энергии резонансного конденсатора. Благоприятного выключения можно достичь в моменты отрицательного тока ключа, т. е. при открытых обратных диодах (рис. 2, в). Основным недостатком представленных схем является невозможность реализации регулирования выходного тока инвертора, что существенно сужает область практического применения приведенных способов обеспечения благоприятной коммутации.

Инвертор тока с фазовым регулированием

При широтно-импульсном регулировании выходного тока, реализуемом, как правило, путем фазового сдвига управляющих импульсов верхней и нижней пар транзисторов, на такте управления кроме интервала передачи энергии в нагрузку γT образуется интервал закорачивания входного источника $(1-\gamma)T$. Выходные параметры определяются длительностью импульсов тока γ

$$U_{\text{вых}} = E/\gamma;$$

$$I_{\text{вых}} = \gamma I_L,$$

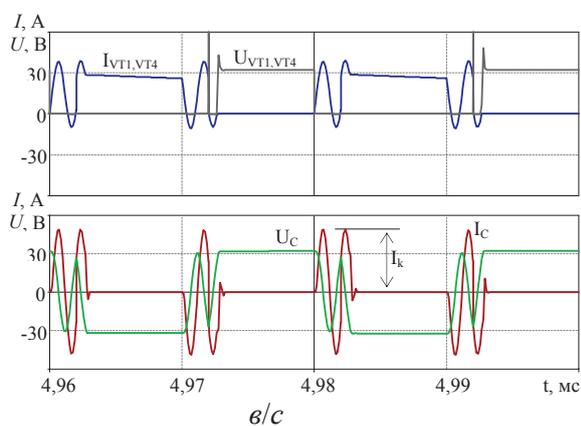
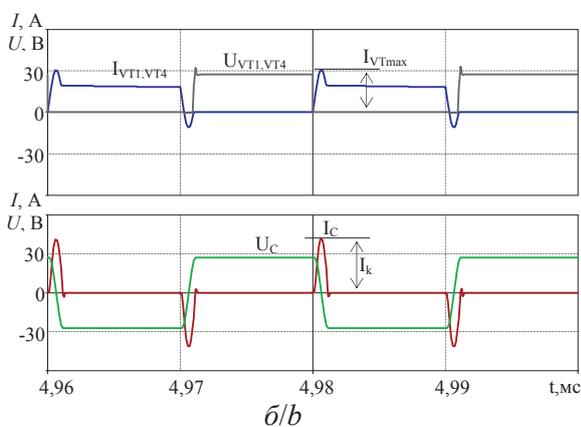
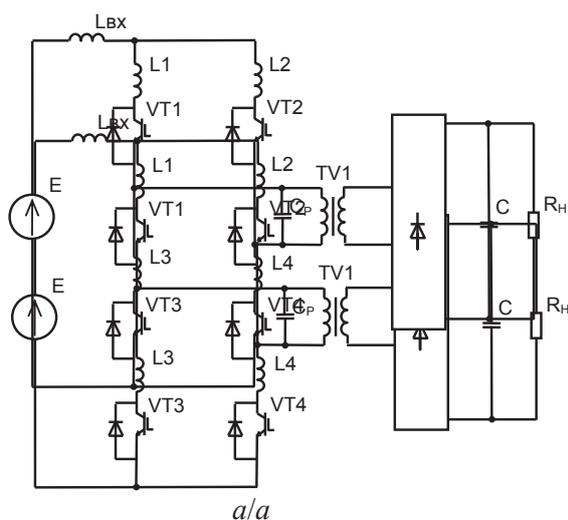


Рис. 2. Инвертор тока без блокирующих диодов и диаграммы его работы: а) схема инвертора тока без блокирующих диодов; б) благоприятное выключение, $t_{\text{pause}}=0,8 \text{ мкс}$; в) неблагоприятное выключение, $t_{\text{pause}}=2 \text{ мкс}$

Fig. 2. Current inverter without blocking diodes and diagrams of its operation: а) current inverter without switching diodes; б) favorable switching off, pause $t_{\text{pause}}=0,8 \text{ ms}$; в) unfavorable switching off, pause $t_{\text{pause}}=2 \text{ ms}$

где E – входное напряжение, т. е. инвертор работает в режиме повышения выходного напряжения. Согласно алгоритму фазового регулирования транзисторы опережающей пары включаются при не-

нулевом напряжении, а транзисторы отстающей пары выключаются при ненулевом токе, поэтому транзисторы опережающей пары должны иметь коммутирующие дроссели, а транзисторы отстающей пары – коммутирующие конденсаторы, соответствующая схема приведена на рис. 3.

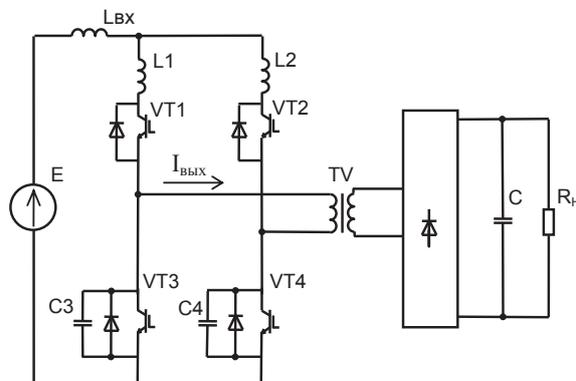


Рис. 3. Инвертор тока с фазовым регулированием

Fig. 3. Current inverter with phase control

Работа схемы отражена на диаграммах (рис. 4). При открытой диагонали транзисторов VT2, VT3 ток входного дросселя заряжает выходной конденсатор, по истечении длительности импульса зарядного тока (момент времени t_1) происходит отпирание транзистора VT1 и начинается процесс нарастания тока в дросселе L1 одновременно с процессом спада тока в L2. После спада тока транзистора VT2 до нуля и возрастания тока VT1 до номинального значения (момент времени t_2) ток нагрузки равен нулю, конденсатор C4 транзистора VT4 начинает разряжаться по цепи VD2–VT1–VT3. Открытое состояние обратного диода на этом интервале создает благоприятные условия для выключения VT2 и переходу к режиму открытой стойки VT1, VT3, т. е. транзистор VT2 выключается. По окончании разряда конденсатора C4 транзистора VT4 (момент времени t_3) открывается обратный диод этого транзистора и накопленный в процессе разряда конденсатора ток дросселей L1, L2 замыкается накоротко по цепи VT1–VT3–VD4–VD2. Таким образом, на интервале закорачивания входного источника ток транзисторов коротящей стойки VT1, VT3 имеет две составляющие: составляющую входного тока I_L и составляющую резонансного тока коммутирующих дросселей $I_{\text{rz+}}$, обусловленную разрядом демпфирующего конденсатора

$$I_{\text{VTmax}} = I_L + I_{\text{rz+}},$$

т. е. ток транзисторов превышает ток входного дросселя I_L на величину $I_{\text{rz+}}$, соответствующую запасенной в конденсаторах энергии. Баланс энергии на этом интервале может быть отражен уравнением

$$\frac{C_4 \cdot U_{\text{вых}}^2}{2} + E_{L_{\text{discharge}}} = \frac{L_1 (I_{\text{VTmax}}^2 - I_L^2)}{2} + \frac{L_2 \cdot I_{\text{rz+}}^2}{2}, \quad (1)$$

согласно которому на увеличение тока в дросселях L1, L2 кроме энергии конденсатора затрачивается

энергия входного дросселя $E_{L_discharge}$, что можно видеть по диаграмме напряжения на входе инвертора $U_{вх}$. Учитывая, что на этом интервале ($t2-t3$) энергия конденсатора делится поровну между дросселями, так как напряжения на них равны, а ток входного дросселя не протекает через дроссель L2, уравнение можно упростить

$$\frac{C_4 \cdot U_{вых}^2}{4} = \frac{L_2 \cdot I_{тз+}^2}{2}.$$

Из полученного уравнения можно определить максимальное значение тока в транзисторах

$$I_{тз+} = \frac{U_{вых}}{\rho} \rightarrow I_{VTmax} = I_L + \frac{U_{вых}}{\rho},$$

где $\rho = \sqrt{2L/C}$ – волновое сопротивление коммутирующего резонансного контура при обмене энергией между двумя дросселями и одним конденсатором. В этом состоянии инвертор находится весь интервал времени, соответствующий закорачиванию входного дросселя $(1-\gamma)T$. По окончании этого интервала включается транзистор VT4, его обратный диод по-прежнему открыт, поэтому включение благоприятное и на диаграммах изменений не происходит. Переход в режим передачи энергии в нагрузку происходит при выключении транзистора VT3 (момент времени $t4$), при этом уменьшение динамических потерь VT3 обеспечивает конденсатор C3, который после выключения начинает заряжаться током I_{C3} , накопленным в индуктивностях L1, L2, заряд сопровождается уменьшением этих токов. После заряда конденсатора C3 до выходного напряжения (момент времени $t5$) открываются диоды выпрямителя и ток начинает поступать в нагрузку.

Процесс заряда конденсатора при пренебрежении затуханием тока коммутирующего контура и пульсациями входного дросселя можно отразить следующим уравнением энергобаланса

$$\begin{aligned} & \frac{C_3 \cdot U_{вых}^2}{2} = \\ & = \frac{L_1(I_{VTmax}^2 - I_{VTcharge}^2)}{2} + \frac{L_2(I_{тз+}^2 - I_{тз-}^2)}{2} + E_{L_charge}. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно этому уравнению заряд конденсатора осуществляется как энергией резонансного контура, накопленной в коммутирующих дросселях, так и энергией входного дросселя E_{L_charge} . Кроме того, изначально энергия, накопленная в коммутирующих дросселях, превышает энергию, необходимую для заряда конденсатора на величину $E_{L_discharge}$ (1). Таким образом, энергия, накопленная в коммутирующих дросселях, превышает энергию, затрачиваемую ими для заряда конденсатора на величину $E_{L_charge} + E_{L_discharge}$, а значит, заряд конденсатора до выходного напряжения произойдет задолго до полного сброса тока резонансного контура при некотором токе

$$I_{VTcharge} = I_L + I_{рез-}.$$

На следующем интервале работы ($t5-t6$) полученный избыток энергии $E_{L_charge} + E_{L_discharge}$ передается в нагрузку.

Определить величину тока $I_{VTcharge}$ можно, учитывая, что половину энергии для заряда конденсатора C3 получает от дросселя L1, а так как напряжения на них равны, уравнение можно упростить

$$\frac{C_3 \cdot U_{вых}^2}{4} = \frac{L_1(I_{VTmax}^2 - I_{VTcharge}^2)}{2},$$

откуда

$$I_{VTcharge} = \sqrt{I_{VTmax}^2 - I_{рез+}^2}$$

или

$$I_{VTcharge} = \sqrt{I_L^2 - 2I_L I_{рез+}}, \quad (3)$$

т. е. ток полного заряда конденсатора равен геометрической разности тока транзисторов коротящей стойки и тока коммутирующего резонансного контура.

После заряда конденсатора C3 до напряжения питания оставшийся в дросселях L1, L2 контурный ток сбрасывается в нагрузку, в момент времени $t6$ токи дросселей уменьшаются до значений $I_{L1} = I_{L2} = 0$, что приводит к запарированию обратного диода транзистора VT2 и переходу в режим передачи энергии от входного источника.



Рис. 4. Коммутационные процессы в инверторе тока при фазовом регулировании. L1, L2=1 мкГн, C3, C4=50 нФ, Rн=10 Ом, E=30 В, $\gamma=0,7$. а) полный такт управления; б) интервал закорачивания источника

Fig. 4. Switching processes in the current inverter at phase control. L1, L2=1 μ H, C3, C4=50 nF, Rн=10 Ohm, E=30 V, $\gamma=0,7$. a) complete control cycle; b) source shorting interval

Главным недостатком представленного способа обеспечения благоприятной коммутации транзисторов является завышение их максимального тока согласно выражению (3), которое по отношению к входному току будет выглядеть следующим образом

$$\sigma I_{VTmax} = \frac{I_{VTmax}}{I_L} = 1 + \frac{U_{вых}}{I_L \rho} = 1 + \frac{\gamma R_H}{\rho}.$$

Видно, что для максимального тока транзисторов определяющим является соотношение сопротивления нагрузки к волновому сопротивлению коммутационного контура.

Выводы

1. В инверторе тока с коммутирующими дросселями и выходным конденсатором на интервале коммутационной паузы формируются резонансные колебания, обеспечивающие выключение транзисторов при нуле тока, причем амплитуда колебаний зависит от типа ключей инвертора. В частности, при ключах с блокирующими диодами амплитуда колебаний тока ограничивается входным током инвертора, а при исполнении ключей инвертора с обратными диодами определяется энергией резонансного конденсатора.

2. Реализация фазового регулирования в инверторе тока меняет режимы коммутации транзисторов, поэтому обеспечение их благоприятного переключения достигается за счет резонансного обмена реактивной энергией между коммутирующими дросселями опережающей пары транзисторов и демпфирующими конденсаторами отстающей пары транзисторов. При этом максимальный ток транзисторов превышает ток входного дросселя на величину реактивного тока коммутирующего контура, определяемого его волновым сопротивлением.
3. В описанном в работе инверторе тока с фазовым регулированием в коммутационных процессах часть энергии входного дросселя поступает в нагрузку через элементы коммутационного контура. Энергия передается в коммутационный дроссель при включении транзистора опережающей пары согласно (1) и в демпфирующий конденсатор при выключении транзистора отстающей пары согласно (2). После полного заряда конденсатора полученная от входного дросселя энергия поступает в нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев А.В. Многозональная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
2. Розанов Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
3. Push-pull converter for high efficiency photovoltaic conversion / P. Petit, M. Aillerie., J.P. Sawicki, J.P. Charles // Energy Procedia. – 2012. – V. 18. – P. 1583–1592.
4. New architecture for high efficiency DC-DC converter dedicated to photovoltaic conversion / P. Petit, A. Zegaoui, J.P. Sawicki, M. Aillerie, J.P. Charles // Energy Procedia. – 2011. – V. 8. – P. 688–694.
5. Система электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2396666; заявл. 29.06.2009; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. – 8 с.
6. Способ электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2488933; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.13, Бюл. № 21. – 7 с.
7. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 126–132.
8. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная, А.А. Ткаченко // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 102–109.
9. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: ВО «Наука», 1994. – 318 с.
10. Mukund R. Patel. Spacecraft power systems. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. URL: http://www.e-reading.mobi/bookreader.php/135136/Patel_-_Spacecraft_Power_Systems.pdf (дата обращения: 15.01.2014).
11. Двухфазный повышающий преобразователь с мягкой коммутацией транзисторов и особенности его динамических свойств / Р.К. Диксон, Ю.Н. Дементьев, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, С.М. Семенов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 96–101.
12. Sheng-Yu Ts., Chih-Yang Hs. Interleaved step-up converter with a single-capacitor snubber for PV energy conversion applications // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2013. – V. 53. – P. 909–922.
13. Идрисов И.К. Комбинированный двухтрансформаторный преобразователь с обратным ключом и мягким включением: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2013. – 22 с.
14. Chanuri Ch., Shahid I., Soib T. A New Soft Switching PWM DC-DC Converter with Auxiliary Circuit and Centre-Tapped Transformer Rectifier // Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology. – Malaysia, 2013. – P. 241–247.
15. Силкин Е.М. Применение нулевых схем инверторов тока с квазирезонансной коммутацией // Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 84–87.
16. Инвертор тока: пат. Рос. Федерации № 2285325; заявл. 28.04.2003; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. – 7 с.
17. Муркин М.Н., Земан С.К., Ярославцев Е.В. Исследование коммутационных процессов в инверторе тока // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 111–116.
18. Розанов Ю.К., Никифоров А.А. Высокочастотная коммутация электрических цепей с резонансными контурами – перспективное направление преобразовательной техники // Электротехника. – 1991. – № 6. – С. 20–28.
19. Мелешин В.И., Якушев В.А., Фрейдлин С. Анализ транзисторного преобразователя тока с «мягкой» коммутацией // Электричество. – 2000. – № 1. – С. 52–56.
20. Prasanna U., Akshay K. Analysis and Design of Zero-Voltage-Switching Current-Fed Isolated Full-Bridge DC/DC Converter // IEEE Electrical and Computer Engineering. – 2011. – P. 239–245.

Поступила 25.02.2015 г.

UDC 621.314

FAVORABLE SWITCHING OF TRANSISTORS OF THE CURRENT INVERTER IN CONVERTERS WITH THE HIGH-FREQUENCY LINK

Aleksandr V. Osipov,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ossan@mail.ru

Yuriy A. Shinyakov,

Dr. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: shua@main.tusur.ru

Artur I. Otto,

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ottoai@mail.ru

Mariya M. Chernaya,

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: cmm91@inbox.ru

Aleksandr A. Tkachenko,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: aem@tusur.ru

The relevance of the research is determined by the need to reduce dynamic losses in transistors of the inverter with high frequency link based on the current adjustable inverter.

The aim of the research is to synthesize the current inverter scheme and to develop the method of its regulation, providing a safe switching of transistors.

Research methods are based on the general theory of electrical circuits, theory of algebraic equations, computing methods and the use of modern instrumental systems and methods of mathematical modeling.

Results. The paper considers switching processes in case of resonant switching of transistors of the current inverter in the converter with the high-frequency link. It is shown that blocking diodes of the inverter restrict amplitude of resonance oscillations of current of transistors at the level of current of the input choke. The exception of blocking diodes leads to essential uprating of current of the transistors, defined by balance of power of reactive elements of a resonant circuit. The authors have studied switching processes of transistors of the inverter in case of phase regulation of an output current. It was ascertained that on the interval of input source short circuit the transistor current consists of the source current component and current component accumulated in switching chokes in case of the capacitor discharge. The authors derived the energy balance equations. They were the base for obtaining the ratios which allow defining the maximum values of current in transistors. The authors made conclusions and discussed the results.

Key words:

Current inverter, switching operations, dynamic losses, switching resonant circuit, safe switching of transistors.

REFERENCES

1. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impulsnaya modulyatsiya. Teoriya i primeneniye v sistemakh preobrazovaniya parametrov elektricheskoy energii* [Multizonal pulse modulation. The theory and application in conversion systems of electric energy parameters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 304 p.
2. Rozanov Yu.K. *Poluprovodnikovye preobrazovateli so vzenom povyshennoy chastoty* [Semiconductor converters with high frequency link]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 184 p.
3. Petit P., Aillerie M, Sawicki J.P., Charles J.P. Push-pull converter for high efficiency photovoltaic conversion. *Energy Procedia*, 2012, vol. 18, pp. 1583–1592.
4. Petit P., Zegaoui A., Sawicki J.P., Aillerie M., Charles J.P. New architecture for high efficiency DC-DC converter dedicated to photovoltaic conversion. *Energy Procedia*, 2011, vol. 8, pp. 688–694.
5. Kudryashov V.S., Elman V.O., Nesterishin M.V., Gordeev K.G., Gladushchenko V.N., Khartov V.V., Kochura S.G., Soldatenko V.G., Melnikov N.V., Kozlov R.V. *Sistema elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [The power supply system of the spacecraft]. Patent RF, no. 2396666, 2010.
6. Karplyuk D.S., Korotkikh V.V., Nestirishin M.V., Openko S.I. *Sposob elektropitaniya kosmicheskogo apparata* [The method of the spacecraft supply]. Patent RF, no. 2488933, 2013.
7. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove reguliruemyykh preobrazovateley s promezhutochnym vzenom povyshennoy chastoty* [The power system based on space vehicles controlled converters with intermediate high frequency link]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 126–132.
8. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M., Tkachenko A.A. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove reguliruemyykh inverterov toka* [Power supply systems of spacecraft based on adjustable current inverters]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 102–109.
9. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyaev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft power supply system]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 318 p.

10. Mukund R. Patel. *Spacecraft power systems*. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. Available at: http://www.e-reading.mobi/bookreader.php/135136/Patel_Spacecraft_Power_Systems.pdf (accessed 15 January 2014).
11. Dikson R.K., Dementev Yu.N., Mikhhalchenko G.Ya., Mikhhalchenko S.G., Semenov S.M. Dvukhfazny povyshayushchy preobrazovatel s myagkoy kommutatsiyey tranzistorov i osobenno sti ego dinamicheskikh svoystv [Dynamic properties of a two-phase boost converter with soft-switching transistors technology]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 96–101.
12. Sheng-Yu Ts., Chih-Yang Hs. Interleaved step-up converter with a single-capacitor snubber for PV energy conversion applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, vol. 53, pp. 909–922.
13. Idrisov I.K. *Kombinirovanny dvukhtransformatorny preobrazovatel s obratnym klyuchom i myagkim vklyucheniem*. Kand. Diss. [Combined two-transformer inverter with reverse key and soft switching. Kand. Diss.]. Tomsk, 2013. 22 p.
14. Chanuri Ch., Shahid I., Soib T. A New Soft Switching PWM DC-DC Converter with Auxiliary Circuit and Centre-Tapped Transformer Rectifier. *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology*. Malaysia, 2013. pp. 241–247.
15. Silkin E.M. Primenenie nulevykh skhem invertorov toka s kvazi-rezonansnoy kommutatsiyey [Applying a zero inverter circuit current with quasi-resonant switching]. *Silovaya elektronika*, 2005, no. 3, pp.84–87.
16. Silkin E.M. *Invertor toka* [The current inverter]. Patent RF, no. 2285325, 2006.
17. Murkin M.N., Zeman S.K., Yaroslavtsev E.V. Issledovanie kommutatsionnykh protsessov v invertore toka [Studying switching processes in current inverter]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 111–116.
18. Rozanov Yu.K., Nikiforov A.A. Vysokochastotnaya kommutatsiya elektricheskikh tsepey s rezonansnymi konturami – perspektivnoe napravlenie preobrazovatelnoy tekhniki [High-frequency switching of electric circuits with resonant circuits is a promising direction in transformative technology]. *Russian Electrical Engineering*, 1991, no. 6, pp. 20–28.
19. Meleshin V.I., Yakushev V.A., Freydlin S. Analiz tranzistornogo preobrazovatelya toka s myagkoy kommutatsiyey [Analysis of the transistor current converter with a «soft» switching]. *Electrical Technology Russia*, 2000, no. 1, pp. 52–56.
20. Prasanna U., Akshay K. Analysis and Design of Zero-Voltage-Switching Current-Fed Isolated Full-Bridge DC/DC Converter. *IEEE Electrical and Computer Engineering*, 2011. pp. 239–245.

Received: 25 February 2015.

УДК 621.313

УЧЕТ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРОВЕРКЕ ПО НАГРЕВАНИЮ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

Зюев Анатолий Михайлович,

д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru

Метельков Владимир Павлович,

канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения аварийности асинхронных электродвигателей, увеличения срока службы и эффективности их использования за счет повышения точности оценки теплового состояния на этапе конструирования электропривода и в период эксплуатации.

Цель работы: определение границ применимости метода средних потерь для оценки теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременном режиме и уточнение этого метода с учетом нелинейной связи скорости старения изоляции с температурой, а также соотношения параметров цикла и постоянных времени нагрева двигателя.

Методы исследования: аналитические методы и вычислительный эксперимент, основанный на пятимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения.

Результаты. Установлено, что существуют такие комбинации параметров цикла в повторно-кратковременном режиме, при которых оценка теплового состояния асинхронного двигателя методом средних потерь является некорректной. Так, при малой продолжительности включения средняя скорость термического старения изоляции обмотки статора за время цикла может существенно превосходить то ее значение, которое получается путем расчета по средней за цикл температуре. Выполнена оценка необходимости учета влияния колебаний температуры обмотки при проверке двигателя по нагреву в зависимости от размера двигателя. Предложен уточненный способ оценки теплового состояния асинхронного двигателя методом средних потерь путем введения поправочного коэффициента, учитывающего нелинейность зависимости скорости старения изоляции от температуры обмотки статора. Получены формулы для расчета этого коэффициента. Показано, что в пределах формальных границ повторно-кратковременного режима (10 мин) расхождение между результатами, полученными аналитически и с помощью пятимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя, использованной в ходе вычислительного эксперимента, весьма невелико и не превышает 6...8 %.

Ключевые слова:

Асинхронный двигатель, метод средних потерь, термическое старение изоляции, обмотка статора, повторно-кратковременный режим.

Постановка задачи

Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее распространенным типом электродвигателей в различных отраслях экономики. По данным ООО «Новатек-Электро» в России работает не менее 50 млн трехфазных АД напряжением 0,4 кВ [1]. При этом ежегодно выходят из строя от 10–12 [2] до 20–25 % установленных АД [3–6]. Например, в сельском хозяйстве средний ресурс электродвигателей переменного тока меньше расчетного в 2,5–3,5 раза [7]. Значительная доля выходов АД из строя связана с обмоткой статора [8]. В различных источниках приводятся разные цифры, характеризующие эту долю, доходящие до 68 % для крановых приводов в [9] и даже 80 % для электроприводов в сельскохозяйственной отрасли [10]. Большую роль в статистике отказов АД играют эксплуатационные причины, приводящие к перегреву обмоток [11].

Большинство выпускаемых в настоящее время асинхронных двигателей – это двигатели с корот-

козамкнутым ротором. У них роторная обмотка не изолирована, вследствие чего она является не самым критичным к нагреву элементом конструкции двигателя, в то время как надежность и долговечность изоляции статорной обмотки зависит от теплового режима при эксплуатации. Эти обстоятельства приводят к выводу о важности получения правильной оценки теплового состояния обмотки статора АД, в том числе на этапе проектирования электропривода, чтобы исключить в дальнейшем эксплуатационные перегрузки двигателя, ведущие к ускоренному исчерпанию ресурса изоляции обмоток и преждевременному выходу из строя.

Попутно отметим, что существует и другая сторона проблемы адекватного выбора двигателей для производственных механизмов. На большинстве работающих промышленных установок мощность электродвигателей завышена на 20–40 %, что говорит о возможности сокращения как затрат на создание электропривода, так и потребления электроэнергии в ходе эксплуатации за счет более ра-

ционального выбора установленной мощности двигателей [12].

Большое количество электроприводов в различных отраслях промышленности функционирует в повторно-кратковременных режимах (ПКР), для которых свойственны периодические изменения величины нагрузки либо чередование периодов работы и паузы. В ПКР температура элементов электродвигателя может существенно изменяться в пределах цикла, что создает проблемы при проверке его теплового состояния. Эти проблемы осложняются тем, что неравномерность графиков температуры зависит от соотношения постоянных времени нагрева двигателя и параметров графика его нагружения.

Точную оценку теплового состояния любого элемента электродвигателя можно получить численными методами с использованием термодинамических моделей электродвигателя [13, 14]. Однако для построения таких моделей требуется достаточный большой объем информации о конструктивных параметрах двигателя, который далеко не всегда доступен при проектировании электропривода. Поэтому представляет интерес рассмотрение косвенных методов оценки теплового состояния двигателя, требующих меньшего объема исходной информации.

Широко распространен классический метод на основе средних потерь, который считается наиболее точным из косвенных методов. Вывод соотношений для метода средних потерь предполагает следующие допущения:

- используется одномассовая модель нагрева, которая позволяет получить максимально простые аналитические зависимости между мощностью потерь и температурой двигателя, так как в этом случае на каждом участке нагрузочной диаграммы процесс изменения температуры двигателя описывается экспоненциальной зависимостью с единственной постоянной времени. Вместе с тем неадекватность этой модели неоднократно отмечалась в литературе [15];
- принимается линейная зависимость скорости старения изоляции (скорость расходования термического ресурса) от температуры, т. е. только в этом случае среднее значение температуры будет определять среднюю скорость старения изоляции.

Рассмотрим обоснованность этих допущений и найдем границы их применимости, которые и определяют границы применимости метода средних потерь.

В литературе, в частности в [16, 17], проведен анализ теплового состояния электродвигателя при циклическом характере его нагружения и установлена связь между частотными параметрами графика нагрузки и максимумами температуры двигателя. Однако этот анализ был выполнен для одномассовой модели нагрева двигателя, то есть для его усредненной температуры. В то же время электродвигатель является существенно неоднород-

ным телом с термодинамической точки зрения, и температуры его отдельных элементов значительно отличаются друг от друга. Поэтому при оценке теплового состояния электродвигателя наибольший интерес представляет тепловое состояние его элементов, наиболее критичных с точки зрения нагрева. Кроме того, существенно отличается динамика температуры разных элементов электродвигателя при переменных режимах его нагружения. Например, динамика температуры обмотки статора существенно выше динамики средней температуры двигателя из-за сравнительно малой теплоемкости меди статора по сравнению с теплоемкостью двигателя в целом, в то время как потери, выделяющиеся в этой обмотке, составляют значительную долю от суммарных потерь в двигателе. Поэтому в переменных режимах нагружения амплитуда колебаний температуры обмотки статора АД может на порядок превосходить амплитуду усредненной по всему двигателю температуры. Это создает возможности выхода отклонений температуры обмотки статора от средней далеко за пределы, при которых еще корректна оценка средней скорости старения изоляции по средней температуре.

Можно показать, что для нелинейной зависимости, связывающей скорость термического старения изоляции с температурой, при колебаниях температуры обмотки средняя скорость старения изоляции (v_{cp}) всегда больше той, которая была бы при неизменной температуре, равной средней (θ_{cp}) [18]. Однако метод средних потерь этот факт никак не учитывает.

Для оценки скорости старения изоляции (v) будем пользоваться формулой Буссинга, полученной исходя из законов кинетики химических реакций [19, 20]:

$$v = k^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{B}{\theta + \theta_A} + G\right), \quad (1)$$

где θ – температура обмотки; $\theta_A = 273$ °C; B и G – постоянные коэффициенты, величина которых зависит от класса нагревостойкости изоляции; $k=1$, если срок службы изоляции измеряется в часах.

В работе ставятся следующие задачи:

1. Определение границ применимости метода средних потерь для оценки теплового состояния АД в повторно-кратковременном режиме.
2. Получение уточненных выражений для метода средних потерь, учитывающих:
 - нелинейность зависимости скорости старения изоляции от температуры;
 - соотношение параметров цикла и постоянных нагрева двигателя.

Объект и методы исследования

В общем случае для выяснения возможности использования средней температуры изоляции на интервале t_n с целью оценки среднего значения скорости старения изоляции на этом же интервале надо сравнивать усредненную по всему интервалу ско-

рость старения изоляции v_{cp} и скорость старения при усредненном значении температуры $v(\theta_{cp})$, где

$$v_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} v(t) dt, \quad \theta_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} \theta(t) dt. \quad (2)$$

На практике функции $v(t)$ и $\theta(t)$ зависят от вида конкретного графика нагружения электропривода, скорости двигателя и других факторов, учет которых аналитически выполнить весьма сложно. Соответственно, для применения оценок, использующих (2), требуются численные методы расчета термодинамических процессов при конкретных условиях функционирования электропривода. С целью оценки ошибки, которую вносят допущения, принимаемые при выводе соотношений метода средних потерь, рассмотрим работу АД в простейшем цикле повторно-кратковременного режима, включающем период работы (t_p) и паузу (рис. 1).

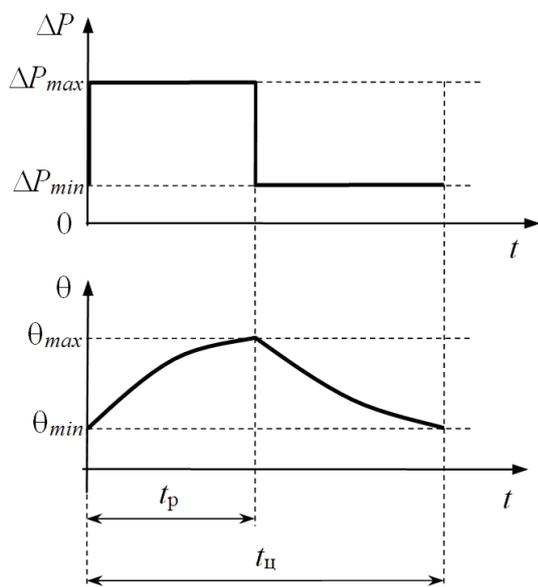


Рис. 1. Простейший цикл ПКР

Fig. 1. Simple cycle of intermittent mode

Будем использовать двухмассовую термодинамическую модель асинхронного двигателя, включающую в качестве своих узлов обмотку статора и остальную часть машины [21]. Такая модель позволяет достаточно точно описать динамику температуры обмотки статора, требуя сравнительно небольшого объема данных о двигателе для определения своих параметров [18].

Решение задачи 1

На рис. 2 показана зависимость отношения $v_{cp}/v(\theta_{cp})=k_v$ от параметров цикла ПКР, где v_{cp} и θ_{cp} вычислены по (2). Здесь ε – относительная продолжительность включения в цикле; $t_{ц}^0=t_{ц}/T_6$ – относительное время цикла; T_6 – базисное время, в качестве которого здесь принимается наибольшая постоянная времени нагрева двигателя по двухмассовой модели, которая для АД закрытого исполнения практически совпадает с постоянной времени одно-

массовой модели. Расчеты выполнялись для двигателей закрытого исполнения, работающих в режиме S3. На интервале t_p использовалась такая величина мощности потерь в двигателе, при которой средняя за цикл мощность потерь (с учетом ухудшения теплоотдачи при паузе) была равна номинальной величине. Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе принят равным 0,4.

Далее индекс «1» будем использовать применительно к величинам, относящимся к первому узлу двухмассовой термодинамической модели (обмотка статора), а индекс «2» применительно ко второму её узлу. Поверхность построена для $\Delta P_{1N}^0=\Delta P_{1N}/(\Delta P_{1N}+\Delta P_{2N})=0,5$ и $C_1^0=C_1/(C_1+C_2)=0,05$ (что близко к средним значениям для двигателей серии 4А в диапазоне номинальных моментов от 7 до 2000 Н·м), где обозначено: ΔP_{1N} и ΔP_{2N} – мощности потерь в узлах модели при работе в номинальном режиме, C_1 и C_2 – теплоемкости узлов.

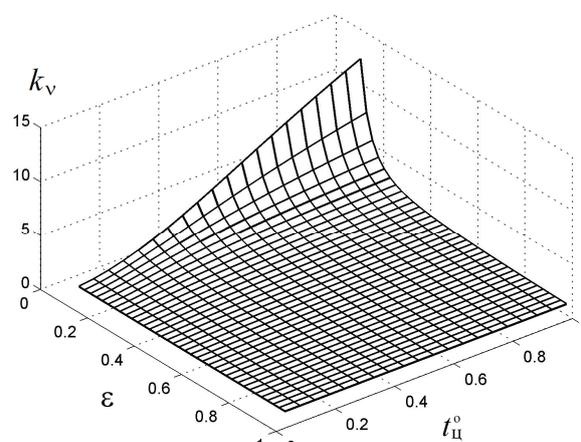


Рис. 2. Зависимость $k_v=v_{cp}/v(\theta_{cp})$ от параметров цикла ПКР для АД с изоляцией класса В при $\Delta P_{1N}^0=0,5$ и $C_1^0=0,05$

Fig. 2. Dependence of $k_v=v_{cp}/v(\theta_{cp})$ on the parameters of the intermittent mode cycle for induction motor with insulation of the class В at $\Delta P_{1N}^0=0,5$ and $C_1^0=0,05$

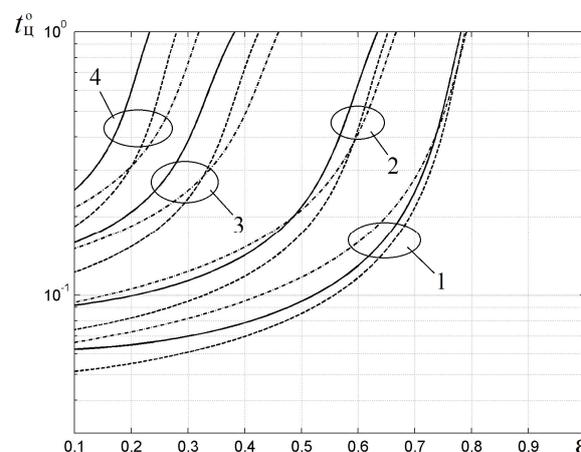


Рис. 3. Линии уровня поверхности $k_v=f(\varepsilon, t_{ц}^0)$, k_v : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Fig. 3. Curves of the surface level $k_v=f(\varepsilon, t_{ц}^0)$, k_v : 1 – 1,1; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 2,0

Из рис. 2 следует, что при малой продолжительности включения ε средняя скорость старения изоляции обмотки статора за цикл может существенно превосходить ее значение, которое получается путем расчета по средней за цикл температуре, причем, чем длительнее цикл, тем сильнее это проявляется. Отметим, что метод средних потерь неявно предполагает равенство $v_{cp} = v(\theta_{cp})$ и рис. 2 наглядно демонстрирует погрешность этого метода. На рис. 3 показаны линии уровня поверхности $k_v = f(\varepsilon, t_n^o)$ для АД с изоляцией класса В при $\Delta P_{1N}^o = 0,75$ и $C_1^o = 0,05$ (непрерывные линии), при $\Delta P_{1N}^o = 0,5$ и $C_1^o = 0,05$ (штрих-пунктир) и при $\Delta P_{1N}^o = 0,6$ и $C_1^o = 0,04$ (пунктир).

Кривые на рис. 3 делят плоскость в координатах t_n^o и ε на области, в которых расчет скорости старения изоляции по средней температуре приводит к большей (слева от кривой) или меньшей (справа от кривой) погрешности. Эти кривые выступают в роли границ области применимости метода средних потерь в случае, если мы считаем приемлемым некоторый уровень k_v , соответствующий данной кривой.

Исследование влияния различных факторов на положение линий уровня в координатах t_n^o и ε показало, что в пределах формальной границы ПКР (600 с) это положение при малых k_v (1,1...1,2) зависит в основном от величины отношения $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$ [22]. Чем больше это отношение, тем правее и ниже лежит линия уровня при одинаковом значении k_v . Расчеты для двигателей серии 4А показали, что отношение $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$ может существенно отличаться для разных двигателей, но максимальные значения не превосходят 15–17 [22]. На положение линий уровня оказывает влияние относительная величина теплоемкости обмотки статора C_1^o , чем она меньше при определенном значении $\Delta P_{1N}^o / C_1^o$, тем больше значение k_v при одинаковых величинах t_n^o и ε , что объясняется увеличением амплитуды колебаний температуры обмотки при уменьшении ее теплоемкости. Если точка в координатах t_n^o и ε лежит ниже кривой с соответствующими значениями ΔP_{1N}^o и C_1^o , то метод средних потерь может быть признан достаточно точным для оценки теплового состояния двигателя. В ином случае он не будет давать достоверный результат и для оценки теплового состояния АД необходимо проведение расчетов с учетом влияния нелинейной связи между скоростью старения изоляции и температурой.

Решение задачи 2

Как учесть увеличение скорости термического старения изоляции от колебаний температуры при оценке теплового состояния двигателя? Самым простым способом такого учета является введение поправочного коэффициента ($k_{\Delta P}$), на который надо умножать средние за цикл потери, чтобы учесть увеличение средней за цикл скорости старения изоляции из-за нелинейности ее зависимости от температуры.

В этом случае соотношение для проверки двигателя по нагреву с использованием метода средних потерь приобретает следующий вид:

$$\Delta P_{\Sigma cp} \cdot k_{\Delta P} \leq \Delta P_N,$$

где $\Delta P_{\Sigma cp}$ – средняя за цикл суммарная мощность потерь в двигателе; ΔP_N – суммарная мощность потерь при работе в номинальном режиме.

Аналитическим путем получено выражение для $k_{\Delta P}$ с использованием двухмассовой термодинамической модели АД:

$$k_{\Delta P} = \frac{[(1 - \Delta P_{1N} / \Delta P_N) - R] \lambda_{20} + QS}{k_3 (\lambda_{12} + \lambda_{20} (1 - R))}, \quad (3)$$

$$\text{где } k_3 = \Delta P_{\Sigma cp} / \Delta P_N; \quad R = \frac{\Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}}{1 - (I_0 / I_{1N})^2 + \Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}};$$

ΔP_{rN} – мощность потерь в обмотке ротора в номинальном режиме; λ_{12} и λ_{20} – тепловые проводимости между узлами двухмассовой термодинамической модели и между вторым узлом и охлаждающей средой; I_0 и I_{1N} – токи статора АД при холостом ходе и в номинальном режиме; Q и S – функции параметров двухмассовой термодинамической модели АД.

Выражение (3) весьма сложно в использовании, так как требует знания параметров термодинамической модели двигателя. Поэтому представляет интерес возможность его упрощения. Можно показать, что выражение (3) удастся преобразовать к более простому виду:

$$k_{\Delta P} = 1 + \ln k_{vN} \frac{(\theta_{доп} + \theta_A)^2}{B \tau_{1N}} L, \quad (4)$$

где B – параметр из выражения (1), определяемый классом изоляции; τ_{1N} – превышение температуры в номинальном режиме (например, 105 °С по ГОСТ Р 52776–2007 при изоляции класса F для двигателей с $P_N \leq 200$ кВт); k_{vN} – коэффициент k_v при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$;

$$L = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{20} \Delta P_{1N} / \Delta P_N}{\lambda_{12} + \lambda_{20} \frac{1 - (I_0 / I_{1N})^2}{1 - (I_0 / I_{1N})^2 + \Delta P_{rN} / \Delta P_{1N}}}. \quad (5)$$

Величина L , рассчитанная по формуле (5), при реальных параметрах АД весьма близка к единице (рис. 4).

Анализ значений параметра L , рассчитанных для 123 двигателей серии 4А закрытого исполнения в диапазоне мощностей от 60 Вт до 315 кВт позволил сформировать рекомендации, касающиеся значений этого параметра, отраженные в таблице.

На рис. 5 показаны кривые, иллюстрирующие погрешность упрощенной формулы (4) для вычисления $k_{\Delta P}$ по сравнению с точным выражением (3). Пунктирные кривые построены по точной формуле (3), а непрерывные – по (4) при $L=1$ для класса В и $L=0,9$ для класса F. Кривые по точной формуле построены при $k_3=0,8; 0,9; 1,0$ (снизу вверх).

Рассмотрим актуальность учета влияния колебаний температуры при проверке двигателя по на-

греву в зависимости от размера двигателя. Формальной границей ПКР является продолжительность цикла 600 с. На рис. 6 показаны зоны I, II, III, в которых находятся значения максимальной продолжительности цикла. Поясним характерные величины наибольшей постоянной времени T для закрытых АД разной мощности и соответствующие ей максимальные длительности цикла ПКР (в относительных единицах – $600/T$):

- I – АД порядка нескольких десятков киловатт 3500...4500 с ($600/T \approx 0,15...0,2$);
- II – АД порядка единиц кВт около 2000 с ($600/T \approx 0,3$);
- III – АД порядка десятков и сотен Вт 1000...1500 с ($600/T \approx 0,4...0,6$).

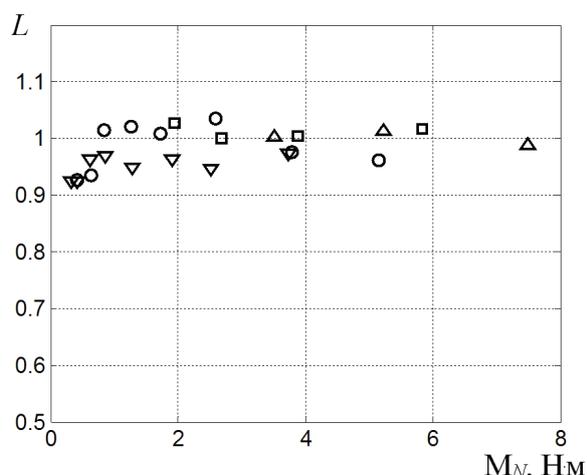


Рис. 4. Значения L для закрытых двигателей серии 4А малых габаритов ($M_N < 7,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$), $2p = \nabla - 2$; $\circ - 4$; $\square - 6$; $\Delta - 8$

Fig. 4. Values of L for enclosed motors of the series 4A small size ($M_N < 7,5 \text{ N}\cdot\text{m}$), $2p = \nabla - 2$; $\circ - 4$; $\square - 6$; $\Delta - 8$

Таблица. Значения параметра L для закрытых АД

Table. Values of L for enclosed motors

| $M_N, \text{Н}\cdot\text{м}/\text{N}\cdot\text{м} \rightarrow$ | < 10 | $10...200$ | $200...1000$ | > 1000 |
|--|---------|------------|--------------|------------|
| $\downarrow n_0, \text{об/мин}/\text{rev}/\text{min}$ | | | | |
| 500 | 1 | 1 | 0,95 | 0,9...0,95 |
| 600 | | | | 0,9 |
| 750 | | 0,95...1 | 0,9...0,95 | 0,85...0,9 |
| 1000 | | | | 0,8...0,85 |
| 1500 | 0,9...1 | 0,9...0,95 | 0,85...0,9 | 0,8...0,85 |
| 3000 | | 0,8...0,9 | 0,7...0,8 | |

На рис. 6 показаны также кривые линий уровня поверхности $k_n = f(\varepsilon t_n^0)$ при $k_v = 1, 1, 1, 1, 2, 2, 0$ ($\Delta P_{1N}^0 = 0,6$ и $C_1^0 = 0,04$), непрерывные линии для изоляции класса В, пунктиром для F. Хорошо видно, что учет нелинейности зависимости $v(\theta)$ при оценке теплового состояния АД более актуален для небольших двигателей (диапазон III), т. к. для них формальная граница ПКР соответствует большему относительному времени цикла.

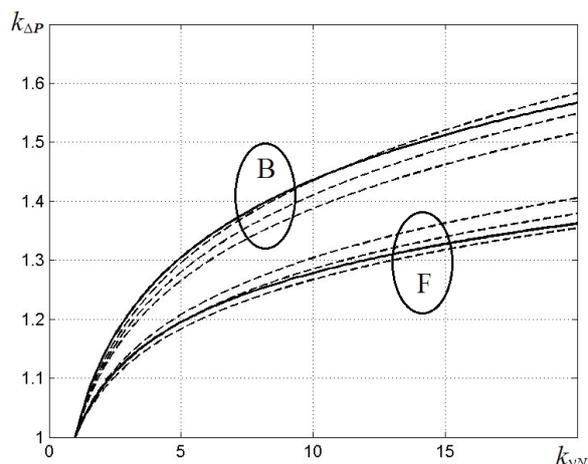


Рис. 5. Зависимости $k_{\Delta P}$ от k_{vN} для АД с изоляцией классов В и F

Fig. 5. Dependences of $k_{\Delta P}$ on k_{vN} for induction motor with insulation of B and F classes

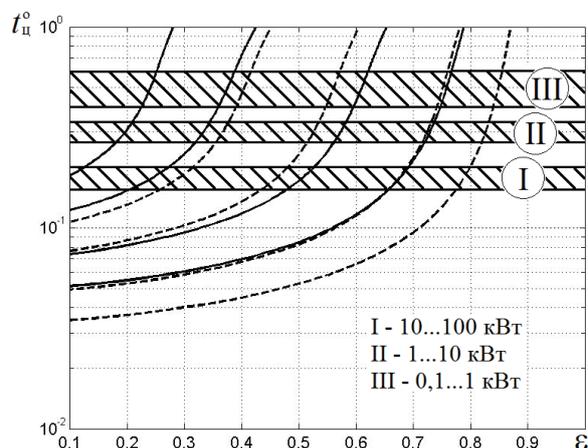


Рис. 6. Зоны характерных величин относительной продолжительности цикла для двигателей разного размера

Fig. 6. Regions of characteristic values of relative cycle time for different size motors

Вычислительный эксперимент

Проверка аналитически полученных выражений проведена с помощью вычислительного эксперимента с использованием комплексной модели, построенной в пакете Simulink [23]. Комплексная модель включает в себя пятимассовую термодинамическую модель закрытого АД, энергетическую модель с учетом температурной зависимости сопротивлений обмоток и модель термического старения изоляции.

На рис. 7 показаны результаты вычислительного эксперимента (\circ при $\varepsilon = 0,15$; \square при $\varepsilon = 0,25$ и Δ при $\varepsilon = 0,40$) в сравнении с расчетными значениями k_v (показаны непрерывными линиями).

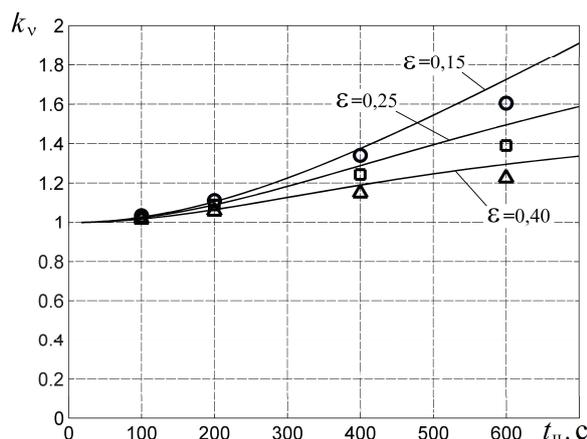


Рис. 7. Зависимости k_v от времени цикла в режиме S3 при условии $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$

Fig. 7. Dependence of k_v on cycle time in S3 mode at $\Delta P_{\Sigma cp} = \Delta P_N$

Из рис. 7 видно, что в пределах формальных границ ПКР (600 с) расхождение между результатами, полученными аналитически и с помощью более точной модели, использованной в ходе вычислительного эксперимента, весьма невелико и не превышает 6...8 %. Это расхождение объясняется

тем, что двухмассовая термодинамическая модель, на основе которой получены использованные аналитические зависимости, не в состоянии также точно, как пятимассовая модель, отразить особенности тепловых потоков между элементами электродвигателя, а также электродвигателем и охлаждающей средой.

Выводы

При формальном выполнении условия проверки по методу средних потерь скорость уменьшения остаточного теплового ресурса изоляции может существенно отличаться от той, которая соответствует обработке двигателем нормативного срока службы. Это обстоятельство приводит к следующим выводам:

1. При использовании косвенных методов проверки, таких как метод средних потерь, необходимо использовать корректирующий коэффициент $k_{\Delta P}$, учитывающий нелинейность зависимости $v(\theta)$.
2. Для сложных циклов целесообразно использование прямых методов проверки теплового состояния электродвигателя, основанных на расчете изменения остаточного ресурса изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соркин М. Универсальная защита для асинхронного электродвигателя: миф или реальность? URL: http://novatek-electro.com/universalnaya_zaschita_dlya_asinhronnogo_elektrodvigatelya_mif_ili_realnost_.html (дата обращения: 09.11.2014).
2. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection / B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman et al. // Protective Relay Engineers: Proc. of 58th Annual Conference. – Kansas City, USA: Black Shulman & Veatch Corporation, 2005. – P. 127–144.
3. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1982. – 140 с.
4. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей // Научные журналы НТУ «ХПИ»: Электротехника и электромеханика. – 2005. – № 1. – С. 59–62.
5. Пономарев В.А., Суворов И.Ф. Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей // Новости электротехники. Проекты. Методики. URL: <http://news.elteh.ru/project/neuron.php> (дата обращения: 12.02.2015).
6. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей / Н.П. Воробьев, С.Н. Воробьева, Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 261–269.
7. Пахомов А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных разрядов: дис. ... д-ра техн. наук. – Краснодар, 2008. – 347 с.
8. Engelmann R.H., Middendorf W.H. Handbook of Electric Motors. – NY: Marcel Dekker, 1995. – P. 375–456.
9. Ведяшкин М.В., Муравлев О.П. Оценка параметров законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации крановых асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 117–121.
10. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их вне-

шнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2009. – 181 с.

11. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
12. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Проблемы и перспективы развития электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 1. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 5–9.
13. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shan-el, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – 2009, March. – V. 56. – № 3. – P. 871–882.
14. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. – Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1995. – 113 p.
15. Усынин Ю.С., Бутаков С.М., Сидоренко Н.Ю. Тепловая модель электродвигателя прокатного стана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2003. – № 11. – Вып. 3. – С. 71–75.
16. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
17. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 361 с.
18. Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамические модели для проверки асинхронного двигателя по нагреванию // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 48–52.
19. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 432 с.
20. Brancato E.L. Estimation of lifetime expectancies of motors // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1992, May/Jun. – V. 8. – № 3. – P. 5–13.
21. Зюзев А.М., Метельков В.П. Термодинамическая модель асинхронного двигателя для электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Ч. 1. – Вып. 3 – С. 138–145.

22. Зюев А.М., Метельков В.П. К оценке теплового состояния асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме // Электротехника. – 2014. – № 9. – С. 19–23.
23. Зюев А.М., Метельков В.П., Максимова В.А. Современные подходы к исследованию тепловых и электродинамических процессов в асинхронном электроприводе // Электромехани-

ческие преобразователи энергии: Матер. VI Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 9–11 октября 2013. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 40–44.

Поступила 25.02.2015 г.

UDC 621.313

ACCOUNTING TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN STATOR WINDING OF INDUCTION MOTOR WHEN CHECKING FOR HEATING IN INTERMITTENT MODE

Anatoliy M. Zyuzev,

Dr. Sc., Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru

Vladimir P. Metelkov,

Cand. Sc., Ural Federal University, 19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

The relevance of the work is caused by the need to reduce the accident rate of induction motors, increase the service life and efficiency of their use by improving the accuracy of the estimation of the thermal state at the design stage and during the exploitation.

The main aim of the study is to determine the limits of applicability of the average loss method for estimating the thermal state of induction motors in intermittent mode and refinement of this method, taking into account the nonlinear coupling between rate of aging of insulation and temperature, as well as the ratio of the cycle parameters and the thermal time constant of the motor.

The methods used in the study: analytical methods and computer experiment based on five masses thermodynamic model of the TEFC induction motor

The results. It was found that there are such combinations of parameters of cycle in intermittent mode for which evaluation of the thermal state of the induction motor by the average loss method is incorrect. Thus, at a low duty ratio the average insulation-aging rate per cycle may exceed its value obtained by calculation based on the average temperature for the cycle. The authors have evaluated the need to consider the effect of winding temperature fluctuations when checking engine for heating according to the size of the engine and proposed a refined method of estimating the thermal state of the induction motor by the average loss method by introducing a correction coefficient that takes into account the nonlinear coupling of the rate of aging of insulation from the stator winding temperature. The formulas for calculating this coefficient were obtained. It is shown that within the formal borders of intermittent mode (10 min), the divergence between the results obtained analytically and via five masses thermodynamic model of the induction motor used in the computational experiment is very small and does not exceed 6...8 %.

Key words:

Induction motor, average loss method, thermal deterioration of insulation, stator winding, intermittent mode.

REFERENCES

1. Sorkind M. *Universalnaya zashchita dlya asinkhronnogo dvigatelya: mif ili realnost?* [Versatile protection for induction motors: myth or reality?]. Available at: http://novatek-electro.com/universalnaya_zaschita_dlya_asinkhronnogo_elektrodvigatelya_mif_ili_realnost_.html (accessed 09 November 2014).
2. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E. etc. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection. *Proceedings of 58th Annual Conference. Protective Relay Engineers.*, Kansas City, USA, Black & Veatch Corporation, 2005. pp. 127–144.
3. Grundulis A.O. *Zashchita elektrodvigatelyey v sel'skom khozyaystve* [Electric motor protection in agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 1982. 140 p.
4. Polkovnichenko D.V. Posleremontnaya otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya korotkozamknutykh asinkhronnykh elektrodvigatelyey [Post-maintenance technical evaluation of cage induction motors]. *Nauchnye zhurnaly NTU «KhPI»: Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2005, no. 1, pp. 59–62.
5. Ponomarev V.A., Suvorov I.F. Kompleksny metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelyey na osnove ispolzovaniia iskusstvennykh neyronnykh setey [An integrated method for diagnosis of asynchronous motors based on the use of artificial neural networks]. *Novosti elektrotehniki. Proekty. Metodiki*. Available at: <http://news.elteh.ru/proect/neuron.php> (accessed 12 February 2015).
6. Vorobyov N.P., Vorobyova S.N., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. Metody i pribory diagnostirovaniya izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigatelyey [Methods and tools for diagnosing the insulation of asynchronous motors]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 2/2, pp. 261–269.
7. Pakhomov A.I. *Metody i sredstva diagnostiki izolyatsii asinkhronnykh dvigatelyey sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na osnove chastichnykh razryadov*. Dis. Dokt. nauk [Methods and tools for the diagnosis of asynchronous motors isolation of agricultural production on the basis of partial discharges. Dr. Diss.]. Krasnodar, 2008. 347 p.
8. Engelmann R.H., Middelndorf W.H. *Handbook of Electric Motors*. New York, Marcel Dekker, 1995. pp. 375–456.

9. Vedyashkin M.V., Muravlyov O.P. Otsenka parametrov zakona raspredeleniya otkazov obmotok statorov pri ekspluatatsii kranovykh asinkhronnykh dvigateley [Estimation of parameters of the laws of distribution of stator windings failures in the operation of asynchronous motors for crane]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 4, pp. 117–121.
10. Tonkikh V.G. *Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateley v selskom khozyaystve na osnove analiza ikh vneshnego magnitnogo polya*. Dis. Kand. nauk [Method of asynchronous motors diagnosis in agriculture on the basis of their external magnetic field. Cand. Diss.]. Barnaul, 2009. 181 p.
11. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. *Ispytaniya i nadezhnost elektricheskikh mashin* [Electric Machines: Tests and Reliability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 232 p.
12. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. Problemy i perspektivy razvitiya elektroprivoda [Power drive systems development problems and prospects]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proc. of the VIII Int. (XIX All-Russian) conf. on the automatic electric drive]. Saransk, 2014. Vol. 1, pp. 5–9.
13. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, March 2009, vol. 56, no. 3, pp. 871–882.
14. Kylander G. Thermal Modelling of Small Cage Induction Motors: Technical Report No. 265. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1995. 113 p.
15. Usynin Yu.S., Butakov S.M., Sidorenko N.Yu. Teplovaya model elektrodvigateleya prokatnogo stana [Heat model of electric drive for rolling mill]. *Vestn. Yuzhno-Ural. Gos. Univ., Ser. Energet.*, 2003, no. 11, vol. 3, pp. 71–75.
16. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [The Theory of Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p.
17. Shreiner R.T., Kostylev A.V., Krivovoyaz V.K., Shilin S.I. *Elektromekhanicheskie i teplovye rezhimy asinkhronnykh dvigateley v sistemakh chastotnogo upravleniya* [Electromechanical and Heat Modes of Induction Motors in Frequency Control Systems]. Yekaterinburg, Russian State Professional Pedagogical University Press, 2008. 361 p.
18. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Thermodynamic Models for Asynchronous Motor Heating Tests *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 9, pp. 512–515.
19. Kuznetsov N.L. *Nadezhnost elektricheskikh mashin* [Electric Machines Reliability]. Moscow, MEI Publ. house, 2006. 432 p.
20. Brancato E.L. Estimation of lifetime expectancies of motors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May/Jun. 1992, vol. 8, no. 3, pp. 5–13.
21. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Termodinamicheskaya model asinkhronnogo dvigatelya dlya elektroprivodov s intensivnymi protsessami teplovydeleniya [Thermodynamic Model of Induction Motor for Electric Drives with Intensive Heat Release]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*, 2010, P. 1, Iss. 3, pp. 138–145.
22. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short-Term Mode. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 9, pp. 554–558.
23. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Maksimova V.A. Sovremennye podkhody k issledovaniyu teplovykh i elektrodinamicheskikh protsessov v asinkhronnom elektroprivode [Modern approaches to the study of thermal and electrodynamic processes in asynchronous electric drive]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii: Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electromechanical energy transformers: Proc. VI Int. scientific conference]. Tomsk, 2013. pp. 40–44.

Received: 25 February 2015.

УДК 621.318.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Нейман Людмила Андреевна,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman@ngs.ru

Нейман Владимир Юрьевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

При сейсморазведке полезных ископаемых широко применяется технология формирования сейсмических волн источниками механических воздействий на землю. Для генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций целесообразно использование линейных электромеханических преобразователей энергии электромагнитного типа. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методик расчета электромагнитных преобразователей в динамических процессах. В особенности это касается вопросов учета влияния насыщения стальных элементов конструкции магнитопровода и потерь активной мощности от действия вихревых токов динамические характеристики преобразователя.

Цель работы заключается в схемной реализации динамической модели электромагнитного преобразователя и разработке устойчивых алгоритмов расчета модели методами структурного моделирования в среде Matlab Simulink, позволяющих производить анализ электромагнитных процессов в нестационарных режимах с учетом насыщения в стальных элементах конструкции и потерь мощности от действия вихревых токов.

Методы исследований. Расчет электромагнитных процессов выполнен с помощью программы Simulink, входящей в состав программного пакета Matlab7.12.0(R211a).

Результаты. Приведено математическое описание мощности потерь из условия равенства потерь в ферромагнитных элементах конструкции магнитопровода и потерь в короткозамкнутом контуре при синусоидальном изменении тока. Учет данных потерь приближенно рассматривается как действие дополнительного короткозамкнутого контура, сцепленного с основным магнитным потоком, созданным намагничивающей обмоткой катушки. Основу расчетной математической модели составляют дифференциальные уравнения электрического и магнитного равновесия, полученные для обобщенной нелинейной схемы замещения катушки и позволяющие учесть влияние возникающих в массивном магнитопроводе вихревых токов, а также потоков рассеяния. Предложены алгоритмы расчета и варианты схемной реализации динамических моделей нелинейной катушки индуктивности с использованием аппарата структурного моделирования, которые могут быть положены в основу расчета динамических рабочих процессов силовых электромагнитных виброударных приводов с целью улучшения их характеристик. Результаты расчетов по представленным в работе алгоритмам полностью согласуются с классическими положениями теории нелинейной электротехники и результатами физического эксперимента. В качестве примера приведены результаты расчета, подтверждающие качественное соответствие результатов моделирования с использованием аппарата структурных схем известным результатам физического эксперимента. В работе также получены рекомендации по выбору параметров структурной модели электромагнитного преобразователя, гарантирующие устойчивые алгоритмы при его расчетах.

Ключевые слова:

Сейсморазведка полезных ископаемых, механическое воздействие на грунт, электромагнитный преобразователь энергии, нелинейная катушка индуктивности, нестационарный режим работы, мощность потерь, методы структурного моделирования.

В отрасли разведки полезных ископаемых широко используется технология формирования сейсмических волн источниками мощных механических воздействий на землю [1, 2]. В качестве возбудителей низкочастотных вибраций и систем генерирования механических воздействий на грунт лидирующую позицию заняли сейсмоисточники, созданные на базе линейных электромеханических преобразователей энергии электромагнитного типа [3, 4].

В настоящее время импульсные и виброимпульсные технологии, созданные на основе линейных электромагнитных преобразователей, являются перспективным направлением современного производства для генерации силовых механических воздействий различных по амплитуде и частоте [5–14].

Вопросы, связанные с совершенствованием методик расчета электромагнитных преобразователей, по-прежнему сохраняют свою актуальность [15–25].

Для корректного исследования динамических процессов электромагнитных преобразователей используется математическое описание, в рамках которого приходится учитывать потери, возникающие в ферромагнитных элементах конструкции массивного магнитопровода. Наибольшие трудности, возникающие при расчете, связаны с учетом потерь от вихревых токов, зависящих от частоты и степени насыщения материала магнитопровода. Особенно эта задача актуальна при расчетах нестационарных режимов [26–32].

Известные в литературе точные методы расчета, учитывающие потери и степень насыщения магнитной цепи, связаны с длительными и трудоемкими вычислениями, так как большинство из них базируются на численном решении уравнений электромагнитного поля [33, 34].

Сложность протекающих в электромагнитном преобразователе нестационарных процессов, неразрывно связанных с параметрами электрической и магнитной цепей, конструкцией и свойствами материала магнитопровода, затрудняет точный учет вихревых токов, обусловленных активными потерями мощности в ферромагнитном сердечнике. Возникновение данных потерь может приближенно рассматриваться как действие вторичного короткозамкнутого контура, сцепленного с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка [35–37].

Основу расчетной модели при таком рассмотрении, как правило, составляют дифференциальные уравнения, полученные для обобщенной схемы замещения электромагнитного преобразователя, представленного в простейшем случае нелинейной катушкой индуктивности с массивным магнитопроводом. Преимущественным способом построения и расчета таких моделей следует признать использование аппарата структурных схем [38].

Цель настоящих исследований заключается в схемной реализации динамической модели линейного электромагнитного преобразователя и разработке устойчивых алгоритмов расчета модели методами структурного моделирования в среде *Matlab Simulink*, позволяющих производить анализ электромагнитных процессов в нестационарных режимах с учетом насыщения в стальных элементах конструкции и потерь мощности от действия вихревых токов.

В качестве базовой модели катушки выбрана конструкция электромагнитного преобразователя с П-образной формой магнитопровода и внешним притягивающимся якорем. При соотношениях размеров магнитной цепи, когда рабочий воздушный зазор $\delta=0$, базовой модели преобразователя соответствует нелинейная катушка индуктивности с массивным магнитопроводом, схема замещения которой изображена на рис. 1.

В схеме (рис. 1) кроме основной обмотки включена короткозамкнутая обмотка, в которой под воздействием переменного магнитного потока наводится ЭДС, вызывающая ток i_B . Исследования показывают, что такая схема замещения катушки соответствует действительным физическим процессам [35].

Магнитодвижущая сила короткозамкнутого контура препятствует прохождению основного магнитного потока, замедляя процесс его изменения.

Уравнения электрического и магнитного равновесия при таком представлении описываются системой уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа

$$u = ir_k + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1)$$

$$iw = \Phi R_M - i_B w_B; \quad (2)$$

$$i_B r_B + w_B \frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad (3)$$

где $u = U_m \sin \omega t$ – напряжение источника питания; U_m – амплитудное значение напряжения; ω – циклическая частота источника; i, i_B – токи в обмотке катушки и короткозамкнутом контуре; r_k, r_B – сопротивления катушки и короткозамкнутого контура, связанного с активными потерями в ферромагнитном сердечнике; w, w_B – число витков катушки и короткозамкнутого контура; Φ – основной магнитный поток; R_M – магнитное сопротивление стального сердечника магнитопровода; L_s – индуктивность рассеяния катушки.

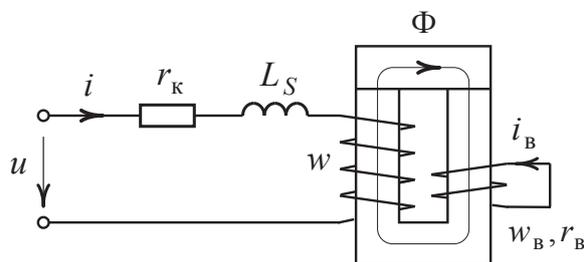


Рис. 1. Схема замещения катушки индуктивности с массивным магнитопроводом

Fig. 1. Equivalent circuit of an inductor with a massive magnetic circuit

Из выражения (3) ток короткозамкнутого контура определится, как

$$i_B = - \frac{w_B}{r_B} \frac{d\Phi}{dt}$$

и уравнения электрического и магнитного равновесия нелинейной цепи (1)–(3) принимают вид

$$\begin{cases} u = ir_k + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt}, \\ iw = \Phi R_M + \frac{w_B^2}{r_B} \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

Оперировав понятием реактивного магнитного сопротивления цепи, можно записать [35]

$$x_\mu = \omega \frac{w_B^2}{r_B}. \quad (5)$$

Из выражения для реактивного магнитного сопротивления (5) следует, что величина индуктивности магнитной цепи, введенная для учета потерь энергии в сердечнике, может быть определена как

$$L_M = \frac{w_B^2}{r_B}. \quad (6)$$

Приближенное решение для индуктивности магнитной цепи может быть получено из условия равенства потерь в стальном магнитопроводе и по-

теперь в короткозамкнутом контуре при синусоидальном изменении потока

$$P_{\text{ст}} = \frac{E_{\text{в}}^2}{r_{\text{в}}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{в}} = \frac{\omega w_{\text{в}} \Phi_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение ЭДС короткозамкнутого контура; Φ_m – амплитуда магнитного потока.

С учетом (5)–(7) величина реактивного магнитного сопротивления и индуктивность магнитной цепи приводятся к виду

$$x_{\mu} = \omega \frac{w_{\text{в}}^2}{r_{\text{в}}} = \frac{2P_{\text{ст}}}{\omega \Phi_m^2}, \quad L_{\text{м}} = \frac{2P_{\text{ст}}}{\omega^2 \Phi_m^2}.$$

В первом приближении при условии синусоидальности индуктивность магнитной цепи при введении удельных потерь на вихревые токи равна

$$L_{\text{м}} = \frac{2P_{\text{ст}}}{\omega^2 \Phi_m^2} = \frac{p_0 \gamma_{\text{ст}} l}{2\pi^2 f^2 B_m^2 S}, \quad (8)$$

где p_0 – величина удельных потерь; $\gamma_{\text{ст}}$ – плотность материала сердечника; l , S – длина и сечение сердечника; f – частота питающего источника; B_m – амплитудное значение индукции.

С учетом (8) система уравнений электрического и магнитного равновесия (4) приводится к виду

$$\begin{cases} u = i r_{\text{к}} + L_{\text{с}} \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt}, \\ iw = \Phi R_{\text{м}} + \frac{p_0 \gamma_{\text{ст}} l}{2\pi^2 f^2 B_m^2 S} \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases} \quad (9)$$

Математическая модель по уравнениям (9) позволяет исследовать как переходные режимы с

учетом потерь в магнитопроводе, так и установившиеся режимы.

В соответствии с уравнениями (9) один из вариантов детализированной структурной схемы базовой модели катушки для расчета электромагнитных процессов может быть представлен в программе «Simulink» в виде схемы, изображенной на рис. 2. Алгоритм расчета реализован с использованием операций интегрирования.

Нелинейные свойства материала магнитопровода учтены с помощью приближенной аналитической аппроксимации зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B=f(H)$ и на рис. 2 реализованы с помощью подсистемы «Subsystem1» (рис. 3).

Входом этой подсистемы (рис. 3) является вектор значений напряженности магнитного поля H , а выходом – вектор соответствующих значений индукции B в магнитопроводе и абсолютной магнитной проницаемости μ_a .

При расчетах использовалась аппроксимация арктангенсом, имеющая следующий вид $B(H)=a_1 \arctg(a_2 H)$, где a_1 и a_2 – коэффициенты, зависящие от магнитных свойств материала сердечника. Данный вид аппроксимации кривой намагничивания является наиболее точным для зависимости $B(H)$. Результат вычислений этой подсистемой $\mu_a(t)$ в переходном режиме представлен на рис. 4.

Следует отметить, что использование функционального блока «Fcn1» для $B(H)$ обусловлено необходимостью повышения устойчивости расчета по указанному алгоритму.

Расчет с использованием блока одномерной таблицы в структурной схеме рис. 2 при описании нелинейных свойств материала магнитопровода демонстрировал вычислительную неустойчивость.

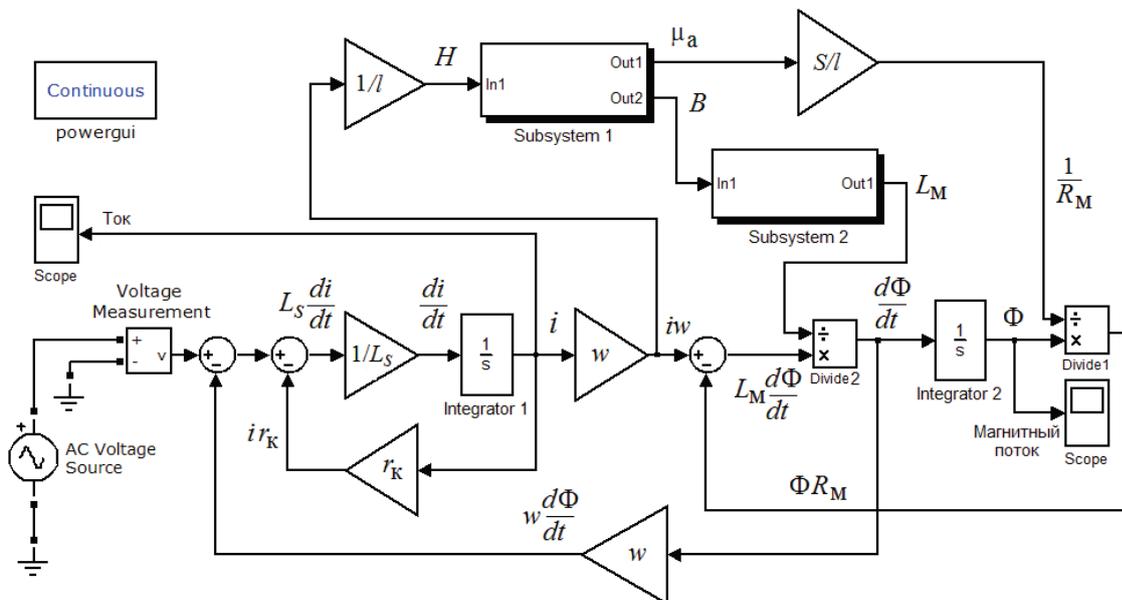


Рис. 2. Структурная схема динамической модели катушки с массивным магнитопроводом

Fig. 2. Block diagram of the dynamic model of the coil with a massive magnetic circuit

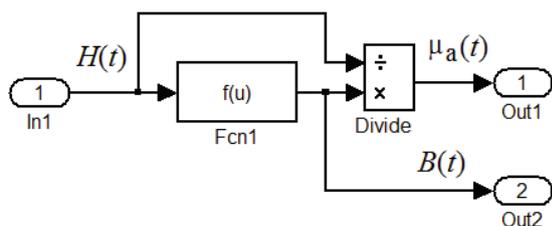


Рис. 3. Детализированная структурная схема учета нелинейных свойств модели «Subsystem1»

Fig. 3. Detailed block diagram of taking into account nonlinear properties of the model «Subsystem1»

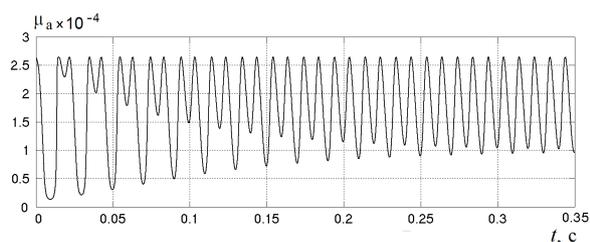


Рис. 4. Зависимость $\mu_a(t)$ в переходном режиме

Fig. 4. Dependence of $\mu_a(t)$ in transition mode

Основу алгоритма приближенного учета потерь мощности в массивном ферромагнитном магнитопроводе составляет подсистема «Subsystem 2» (рис. 2), которая в развернутом виде представлена на рис. 5.

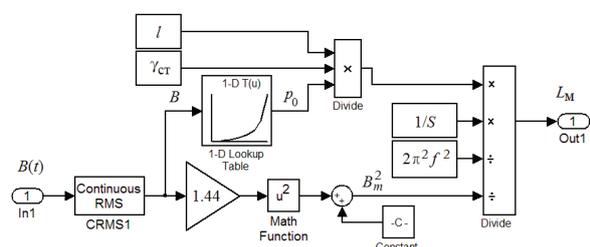


Рис. 5. Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem 2»

Fig. 5. The detailed block diagram of the subsystem «Subsystem 2»

Входной величиной этой подсистемы является вектор индукции магнитного поля. Значение магнитной индуктивности, получаемое на выходе подсистемы (рис. 5), пропорционально потерям от вихревых токов в массивном магнитопроводе.

Нелинейность зависимости удельных потерь $p_0(B)$ в материале магнитопровода от степени его насыщения учтена с помощью блока одномерной таблицы «Table». Для использования нелинейного блока в него необходимо внести параметры, соответствующие конкретному материалу магнитопровода.

Результаты моделирования базовой модели катушки (рис. 2) в виде переходных графиков тока и магнитного потока при нулевых начальных условиях приведены на рис. 6, 7.

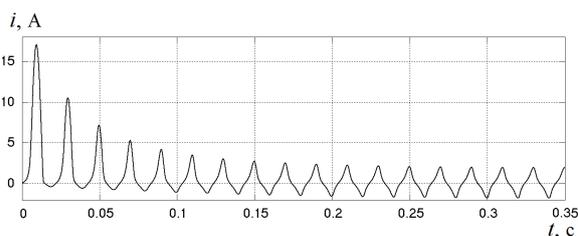


Рис. 6. Расчет тока в катушке при синусоидальном напряжении

Fig. 6. Calculation of current in the coil with sinusoidal voltage

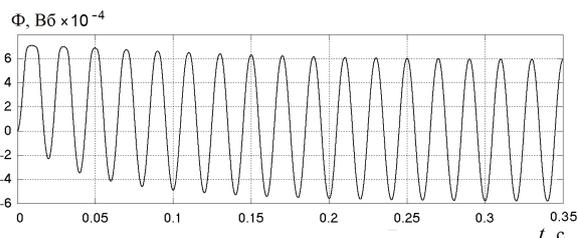


Рис. 7. Расчет потока катушки при синусоидальном напряжении

Fig. 7. Calculation of the coil flow with sinusoidal voltage

В примере приняты следующие значения параметров модели катушки индуктивности с массивным магнитопроводом: $U_m=40$ В; $f=50$ Гц; $r_k=0,5$ Ом; $L_s=0,005$ Гн; $w=200$; $l=0,25$ м; $S=4 \cdot 10^{-4}$ м²; сердечник магнитопровода выполнен из электротехнической стали марки «1212» с толщиной листов 0,5 мм; $\gamma_{ст}=7750$ кг/м³.

Анализ результатов моделирования показывает, что влияние вихревых токов на форму и величину тока, определяющего намагничивающую силу, становится заметным при индукциях $B > 1$ Тл. Качественное сравнение результатов расчета методами структурного моделирования полностью согласуется с известными результатами физического эксперимента [39].

В случае упрощения математической модели катушки (8), если принять $L_s=0$, может быть предложен более устойчивый алгоритм расчета, реализованный с помощью структурной схемы, изображенной на рис. 8.

Реализация алгоритма вычислений в такой структуре не вызывает особых затруднений. В отличие от структурной схемы рис. 2 нелинейные свойства материала магнитопровода учтены с помощью блока одномерной таблицы в виде зависимости $H=f(B)$ (рис. 8).

При этом полученные временные зависимости для тока и магнитного потока в достаточной степени точности повторяют характер аналогичных зависимостей, рассчитанных по структурной схеме рис. 2 для случая $L_s \approx 0$.

Реализация алгоритма расчета с использованием операций дифференцирования представлена на рис. 9.

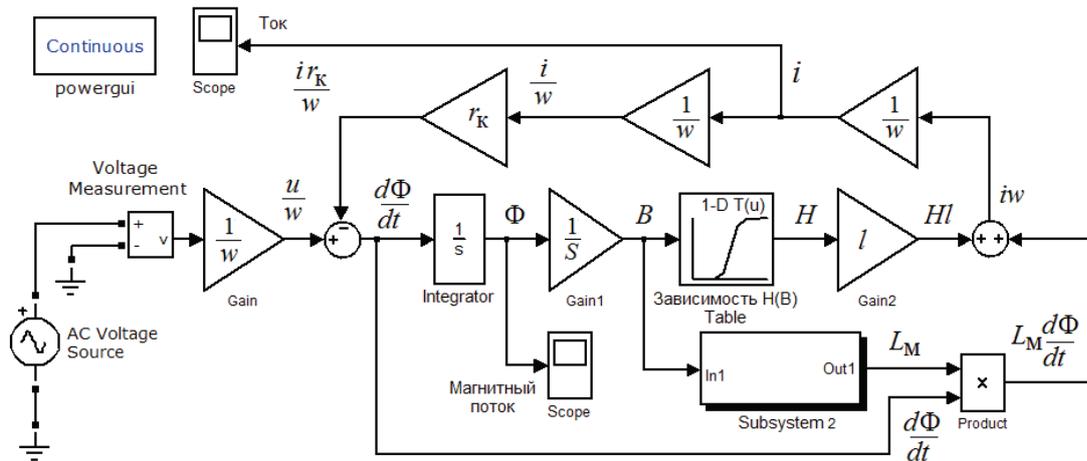


Рис. 8. Структурная схема упрощенной динамической модели катушки с массивным магнитопроводом

Fig. 8. Block diagram of a simplified dynamic model of the coil with a massive magnetic circuit

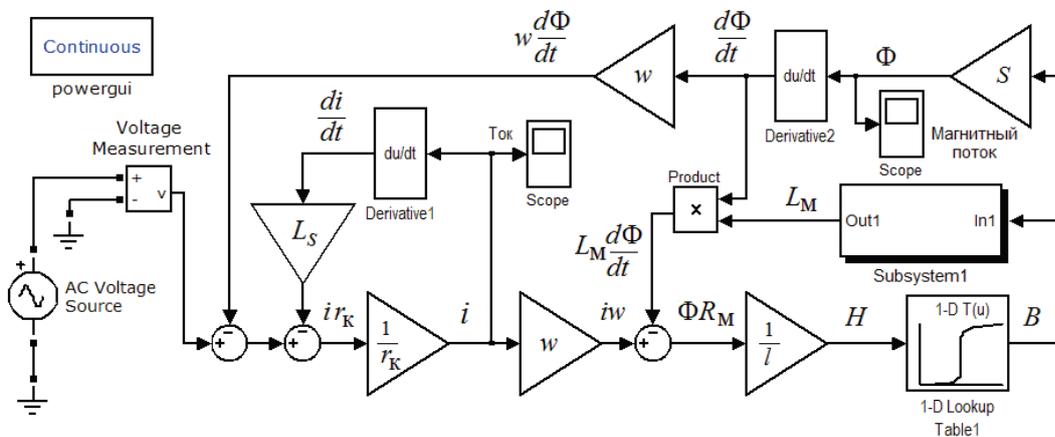


Рис. 9. Структурная схема динамической модели катушки

Fig. 9. Block diagram of the coil dynamic model

Нелинейные свойства материала магнитопровода учтены с помощью блока одномерной таблицы «Table1» в виде зависимости $B=f(H)$. Результаты моделирования по данному алгоритму полностью соответствуют переходным графикам, представленным на рис. 6, 7.

Численные расчеты на модели с дифференцированием (рис. 9) демонстрировали высокую вычислительную устойчивость предложенного алгоритма.

Для количественной оценки в адекватности представленных динамических моделей на рис. 10 приведена осциллограмма тока нелинейной катушки индуктивности, имеющая следующие параметры: $r_k=140$ Ом; $L_s=0,004$ Гн; $w=1100$; сердечник магнитопровода выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойствам к стали марки «1212», и с толщиной листов 0,5 мм; $\gamma_{ст}=7750$ кг/м³; длина сердечника $l=120$ мм; сердечник имеет прямоугольное сечение со сторонами 20×25 мм. Катушка получает питание от синусоидального источника напряжения амплитудой $U_m=155$ В промышленной частоты $f=50$ Гц.

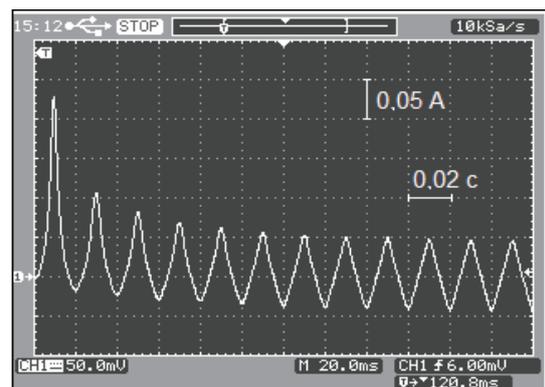


Рис. 10. Осциллограмма тока

Fig. 10. Current oscillogram

С учетом допущения о возможности замены контуров вихревых токов эквивалентным короткозамкнутым контуром на рис. 11 рассмотрена численная реализация расчета для тока в среде «Simulink» с использованием структурной схемы рис. 2. Аналогичные результаты наблюдались при расче-

тах с использованием структурной схемы рис. 9. Расчетные и экспериментальные данные практически совпадают. Погрешность вычисления динамических характеристик моделей уменьшается с повышением точности учета нелинейных свойств сердечника магнитопровода.

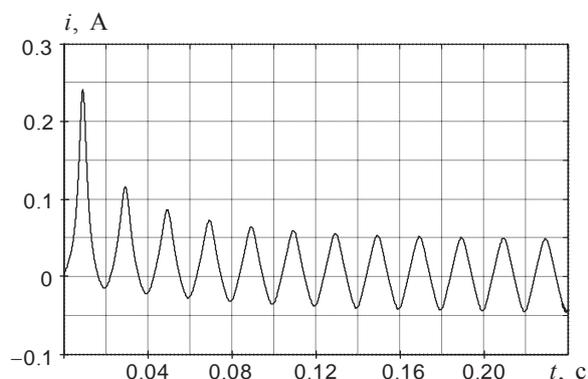


Рис. 11. Расчет тока в катушке

Fig. 11. Calculation of current in the coil

Выводы

1. Рассмотренный вариант математического описания потерь в массивном магнитопроводе электромагнитного преобразователя позволяет

производить их количественный учет при анализе электромагнитных процессов в нестационарных режимах методами структурного моделирования.

2. Использование наиболее распространенного способа математического описания обобщенной нелинейной модели катушки на базе уравнений электрического и магнитного равновесия и численная реализация расчета с помощью операции интегрирования или дифференцирования показывают высокую вычислительную устойчивость предложенных алгоритмов методами структурного моделирования.
3. Предложенные алгоритмы электромагнитного расчета и варианты схемной реализации динамической модели нелинейной катушки методами структурного моделирования, позволяющие учесть насыщение и влияние вихревых токов, возникающих в массивном магнитопроводе, могут быть положены в основу расчета динамических рабочих процессов электромагнитных виброударных приводов с целью улучшения их характеристик.
4. Расчеты по представленным в работе алгоритмам полностью согласуются с классическими положениями теории нелинейных цепей и результатами физического эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или вибрационные технологии // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5. – № 3 (25). – С. 289–306.
2. Шнейерсон М.Б. Теория и практика наземной сейсморазведки. – М.: Недра, 1988. – 527 с.
3. Щадин П.Ю. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей». Обзор моделей и опыт практического применения // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – № 4. – С. 6–12.
4. Певчев В.П., Ивашин В.В. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
5. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курганского госуниверситета, 2006. – 284 с.
6. Усанов К.М., Каргин В.А. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
7. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
8. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 656–665.
9. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // Journal of Mining Science. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 372–381.
10. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
11. Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2011. – С. 209–211.
12. Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 177–183.
13. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
14. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
15. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices // Russian Electrical Engineering. – 2010. – V. 81. – № 4. – P. 213–216.
16. Кудинов А.К., Певчев В.П. Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.
17. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 108–111.
18. Мошкин В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
19. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Вест-

- ник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1. – № 1. – С. 39–44.
20. Мошкин В.И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 93–96.
 21. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 29. – С. 239–240.
 22. Ивашин В.В., Певчев В.П. Анализ влияния неравномерности зазора мощного электромагнитного двигателя на развиваемую механическую силу и энергию // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 9–12.
 23. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
 24. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
 25. Нейман Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 184–190.
 26. Ивашин В.В., Певчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 42–46.
 27. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2 с (66). – С. 130–135.
 28. Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
 29. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: ИЦ «Академия», 2005. – 336 с.
 30. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61–67.
 31. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука. 1987. – 160 с.
 32. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
 33. О проектировании электромагнитов с заданными динамическими свойствами / А.Г. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, Ю.А. Никитенко и др. // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 53–58.
 34. Корсун М.М., Ступаков И.М., Рояк М.Э. Об использовании граничных элементов при моделировании электромагнитных процессов с существенным влиянием вихревых токов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 101–109.
 35. Гринченков В.П., Ершов Ю.К. Метод расчета динамических характеристик электромагнитов с массивным магнитопроводом // Известия вузов. Электромеханика. – 1989. – № 8. – С. 61–68.
 36. Климеко Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров // Электричество. – 1984. – № 11. – С. 51–55.
 37. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
 38. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
 39. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергия, 1967. – Т. 2. – 407 с.

Поступила 20.10.2014 г.

UDC 621.318.4

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN ELECTROMAGNETIC ENERGY CONVERTERS FOR FORCE EFFECTS AND LOW-FREQUENCY VIBRATIONS GENERATION SYSTEMS

Lyudmila A. Neyman,

Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Prospect,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman@ngs.ru

Vladimir Yu. Neyman,

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Prospect,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

Mechanical source effect on the ground is a seismic wave generation technology widely used in minerals seismic exploration. Force effect and low-frequency vibration generation systems are advantageous because of electromagnet-based electromechanical energy converters. The improvement of such converters design methods is an actual problem. This concerns especially the issues of considering the influence of steel elements saturation in magnetic core construction and losses of active power caused by eddy currents.

The aim of the research is to design the electromagnetic converter dynamic model and to develop stable design algorithms with structure modeling methods in Matlab Simulink which are capable of analyzing non-stationary electromagnetic processes with respect to steel elements saturation and eddy-current losses.

Research methods. Electromagnetic processes have been simulated in Matlab 7/12/0 (R2011a) Simulink.

Results. The paper introduces the mathematical description of power losses with respect to equality of losses in magnetic core ferromagnetic elements and in the short-circuit contour when current is sinusoidal. The losses influence is approximately taken into account as an additional short-circuit contour linked with the main magnetic flux generated by the magnetizing winding of the inductor. The design model consists of electrical and magnetic balance differential equations derived for a non-linear equivalent circuit of the inductor. This model permits to take into account eddy currents in the solid magnetic core and leakage fluxes. The proposed design algorithms and circuit implementation of dynamical models of a non-linear inductor obtained by structured simulation can be accepted as the base of the design of dynamical operation processes in power electromagnetic vibroimpact drives to improve their characteristics. The results of calculations with the algorithms stated in the paper completely agree with classical statements of the non-linear electrical circuit theory and physical experiments results. Some examples of calculations approving structured simulation results coincide qualitatively with physical experiment results. There are several recommendations for choosing electromagnetic converter structured model parameters providing design algorithms stability.

Key words:

Minerals seismic exploration, mechanical effect on the ground, energy electromagnetic converter, non-linear inductor, non-stationary operation mode, power loss, structured simulation methods.

REFERENCES

1. Babichev A.P. Tekhnologicheskoe primeneniye kolebany ili vibratsionnyye tekhnologii [Technological application of vibration or oscillation technology]. *Vestnik DGTU*, 2005, vol. 5. no. 3 (25), pp. 289–306.
2. Shneerson M.B. *Teoriya i praktika nazemnoy seysmorazvedki* [Theory and practice of seismic survey]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 527 p.
3. Shhadin P.Yu. Impulsnyye elektromagnitnyye seysmoistochniki «Enisei». Obzor modeley i opyt prakticheskogo primeniya [Pulsed electromagnetic source array «Enisei». Overview of models and practical experience]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*, 2005, no. 4, pp. 6–12.
4. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovaniye moshchnyykh korotkikhodovykh impulsnykh elektromagnitnykh dvigateley* [Designing powerful short-stroke pulsed electromagnetic motors]. Tolyatti, TGU Press, 2012. 142 p.
5. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineyny impulsnyy elektromagnitnyy privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive cars with independent power supply]. Kurgan, Kurgan State University Press, 2006. 284 p.
6. Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impulsnaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt [Power electromagnetic pulse system for immersion rod elements in the soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 2005, no. 3, pp. 59–61.
7. Ivashin V.V., Pevchev V. P., Kudinov A. K. Elektromagnitnyye privody dlya impulsnykh i vibroimpulsnykh tekhnology [Electromagnetic actuators for pulse and vibro-pulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
8. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656–665.
9. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381.
10. Ivashin V.V., Pevchev V.P., Kudinov A. K. Elektromagnitnyye privoda dlya impulsnykh i vibroimpulsnykh tekhnology [Electromagnetic drive for pulse and vibro-pulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
11. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. Tendentsii v razvitiy konstruktsiy sinkhronnykh dvukhobmotochnyykh elektromagnitnykh mashin dlya impulsnykh tekhnology [Trends in development of structures of synchronous two-winding machines for pulsed electromagnetic technology]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye problemy energetiki APK»* [Proc. of the II Intern. scientific-practical. conf. Actual problems of energy APC]. Saratov, 2011. pp. 209–211.
12. Neyman L.A. Otsenka konstruktivnogo sovershenstva sistem okhlazhdeniya sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya [Evaluation of structural perfection of the cooling systems in synchronous machines of electromagnetic percussion]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 177–183.
13. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochy tsikl dvukhkatusechnoy sinkhronnoy elektromagnitnoy mashiny so svobodnym vybegom boyka [Duty cycle of two-coil synchronous electromagnetic

- machine with striker free path]. *Izvestiya vuzov Elektromekhanika*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
14. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impulsnykh sistem [Prospects for development of power electromagnetic pulse-signal system]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
 15. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 4, pp. 213–216.
 16. Pevchev V.P., Kudinov A.K. Sostavlenie skhem zameshcheniya elektromagnitnykh sistem [Compilation of equivalent circuits of electromagnetic systems]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 3, pp. 32–36.
 17. Moshkin V.I., Ugarov G.G. K vyboru osnovnykh bazisnykh razmerov lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [On the issue of choosing the size of the main basis of linear electromagnetic motors]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 108–111.
 18. Moshkin V.I. K raschetu usliya uderzhaniya integrirovannogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya [On calculation of hold condition of integrated linear electromagnetic motor]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 8, pp. 60–64.
 19. Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. Issledovanie rezhimov forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoy energii v impulsnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigatelyakh [Research of modes of accelerated accumulation of magnetic energy in the pulse electromagnetic linear motors]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 39–44.
 20. Moshkin V.I. Sravnenie magnitnykh tsiklov impulsnogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya s uchetom moshchnosti poter v ego obmotke [Comparing magnetic pulse cycles of linear electromagnetic motor based on the power loss in its winding]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 93–96.
 21. Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. Ob optimalnykh usloviyakh energopreobrazovaniya v elektromagnitnykh privodakh [On optimal conditions of energy conversion in electromagnetic actuators]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 29, pp. 239–240.
 22. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Analiz vliyaniya neravnomernosti zazorov moshchnogo elektromagnitnogo dvigatelya na razvivaemyu mekhanicheskuyu silu i energiyu [Analysis of impact of gap irregularity in a powerful electromagnetic engine on mechanical strength and energy]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 9, pp. 9–12.
 23. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [On the method to the choice of an electromagnet on the constructive factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
 24. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. K voprosu ucheta glavnykh razmerov pri vybore tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the issue of consideration of the main sizes when selecting the type of electromagnet by the value of the constructive factor]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50a–53.
 25. Neyman L.A. K resheniyu zadachi ratsionalnogo vybora elektromagnitnogo dvigatelya zadannogo gabarita i vesa na osnove chislennogo eksperimenta [The solution of the rational choice of electromagnetic motor with the specified dimensions and weight on the basis of the numerical experiment]. *Nauchny vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 184–190.
 26. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Osobennosti dinamiki raboty i energeticheskikh diagramm impulsnogo elektromagnitnogo privoda pri paralelnom i posledovatelnom soedinenii obmotok vzbuzhdeniya [Features of the operation dynamics and energy diagrams of pulsed electromagnetic actuator for parallel and series connection of excitation windings]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 42–46.
 27. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Energeticheskaya i dinamicheskaya effektivnost odnoobmotochnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley s vozvratnoy pruzhinoy [Energy efficiency and dynamic single-winding linear electromagnetic motor with return spring]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 2 s (66), pp. 130–135.
 28. Neyman L.A., Skotnikov A.A., Neyman V.Yu. Issledovanie nagreva elektromagnitnogo dvigatelya v perekhodnykh rezhimakh [Study of electromagnetic heating engine in transient modes]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 6, pp. 50–54.
 29. Bul O.B. Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices: magnetic circuit and field program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
 30. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Predelnye silovye kharakteristiki elektromagnitnykh dvigateley postoyannogo toka [Limit power characteristics of DC electromagnetic motors]. *Elektrotehnika*, 2009, no. 12, pp. 61–67.
 31. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. Vvedenie v teoriyu energopreobrazovaniya elektromagnitnykh mashin [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.
 32. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Lvitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressesy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
 33. Nikitenko A.G., Bakhvalov Yu.A., Nikitenko Yu.A. O proektirovani elektromagnitov s zadannymi dinamicheskimi svoystvami [Design of electromagnets with the specified dynamic properties]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 53–58.
 34. Korsun M.M., Stupakov I.M., Royak M. Ob ispolzovanii granichnykh elementov pri modelirovani elektromagnitnykh protsessov s sushchestvennym vliyaniem vikhrevykh tokov [Use of boundary elements when simulating electromagnetic processes with a significant influence of eddy currents]. *Nauchny vestnik NGTU*, 2010, no. 2 (39), pp. 101–109.
 35. Grinchenkov V.P., Ershov Yu.K. Metod rascheta dinamicheskikh kharakteristik elektromagnitov s massivnym magnetoprovodom [The method of calculating the dynamic characteristics of electromagnets with a massive magnetic circuit]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1989, no. 8, pp. 61–68.
 36. Klimeko B.V. Integrirovaniye uravneniy dinamiki elektromagnitov pri nalichii vtorichnykh konturov [Integration of the dynamics equations of electromagnets with the secondary circuit]. *Elektrichestvo*, 1984, no. 11, pp. 51–55.
 37. Chunikhin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electric vehicles]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p.
 38. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
 39. Neyman L.R., Demirchan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Leningrad, Energiya Publ., 1967. Vol. 2, 407 p.

Received: 20 October 2014.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{пр.}$, Φ_i , но Al_2O_3 , $\cos\alpha_i$, max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

Петров Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

Иванов Андрей Андреевич, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

Ключевые слова: (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати *xx.xx.2015*. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,08. Уч.-изд. л. 17,25.
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